

Capítulo 3

Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice y Puzolanas Naturales



Fig. 3-1. Materiales cementantes suplementarios. De la izquierda para la derecha, ceniza volante (Clase C), metacaolinita (arcilla calcinada), humo de sílice, ceniza volante (Clase F), escoria y esquisto. (IMG12187)

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice (sílice activa, microsílíce) y las puzolanas naturales, tales como esquisto calcinado, arcilla calcinada o metacaolinita, son materiales que, cuando son usados conjuntamente con el cemento portland o el cemento adicionado, contribuyen para la mejoría de las propiedades del concreto endurecido, debido a sus propiedades hidráulicas o puzolánicas o ambas (Fig. 3-1). La puzolana es un material silíceo o silíceo aluminoso que, cuando está en la forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes. Las puzolanas y las escorias se clasifican como material cementante suplementario o aditivo (adición) mineral. Las Tablas 3-1 y 3-2 listan las especificaciones definidas para estos materiales. El uso de estos materiales en los cementos adicionados se discute en el Capítulo 2 y por Detwiler, Bhatti y Bhattacharja (1996).

El uso de materiales cementantes suplementarios en concreto viene creciendo desde la década de 70. La mayoría de estos materiales son subproductos de procesos indus-

triales. Su empleo sensato es deseable no sólo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía, sino también por los beneficios que estos materiales pueden ofrecer al concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se adicionan al concreto como parte del sistema cementante. Se los puede utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento portland o del cemento adicionado, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se usan para mejorar una propiedad particular del concreto, tal como resistencia a la reactividad álcali-agregado. La cantidad óptima de adición se debe establecer a través de pruebas para determinar (1) si el material realmente mejora la propiedad y (2) la correcta cantidad, pues una sobredosis o

Tabla 3-1. Especificaciones y Clases de los Materiales Cementantes Suplementarios en los Estados Unidos

Escorias granuladas de alto horno de hierro —ASTM C 989 (AASHTO M 302)
Grado 80
Escorias con bajo índice de actividad
Grado 100
Escorias con índice moderado de actividad
Grado 120
Escorias con alto índice de actividad
Ceniza volante y puzolana natural—ASTM C 618 (AASHTO M 295)
Clase N
Puzolanas naturales crudas o calcinadas, incluyendo:
Tierras diatomáceas (tobas)
Sílex opalino y esquistos
Tufo y cenizas volcánicas o pumitas (piedras pómez)
Arcillas calcinadas, incluyendo metacaolinita y esquisto
Clase F
Ceniza volante con propiedades puzolánicas
Clase C
Ceniza volante con propiedades puzolánicas y cementantes
Humo de sílice —ASTM C 1240

Tabla 3-2. Normas de Especificación de las Puzolanas, Escorias, Ceniza Volante y Humo de Sílice

País	Norma
Argentina	IRAM 1668, IRAM 1506, IRAM 1557, IRAM 1667
Chile	NCh161.EOf1969
Colombia	NTC 3493, NTC 4637
Ecuador	NTE 0491, NTE 0494
México	NMX-C-146
Perú	NTP 334.104, NTP 334.087
Uruguay	UNIT 1047

Tabla 3-3. Normas de Ensayo de las Cenizas Volantes y las Puzolanas

País	Norma
Argentina	IRAM 1654, IRAM 1668
Colombia	NTC 1784, NTC 3823
Ecuador	NTE 0495, NTE 0496, NTE 0497, NTE 0498
Estados Unidos	ASTM C 311
México	NMX-C-179
Perú	NTP 334.055, NTP 334.066, NTP 334.117
Uruguay	UNIT 1035, UNIT 1038, UNIT 1039
Venezuela	COVENIN 3135

una dosis insuficiente pueden ser perjudiciales o los efectos deseados no se logran. Los materiales cementantes suplementarios también reaccionan de manera diversa con los diferentes tipos de cemento.

Tradicionalmente, la ceniza volante, escoria, arcilla calcinada, esquistos calcinados y humo de sílice se usaban separadamente en el concreto. Actualmente, debido a la facilidad del acceso a estos materiales, los productores de concreto pueden combinar dos o más de estos materiales, para optimizar las propiedades del concreto. Las mezclas que usan tres materiales cementantes, llamadas mezclas ternarias, se están haciendo comunes. En los Estados Unidos, los materiales cementantes suplementarios se usan, por lo menos, en 60% del concreto premezclado (PCA 2000). La Tabla 3-3 presenta las normas de ensayo de las cenizas volantes y las puzolanas en varios países.

CENIZAS VOLANTES

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en los Estados Unidos. Bajo la ignición (combustión) en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbono del carbón se queman. Durante la combustión, las impurezas minerales del carbón (tales como arcilla, feldespato, cuarzo y esquistos) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso,

el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas llamadas cenizas volantes (Fig. 3-2). Luego, se colecta la ceniza volante de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga. La ceniza volante es un polvo finamente dividido parecido al cemento portland (Fig. 3-3).

La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores. Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1 μm (micrómetro) hasta más de 100 μm , siendo que el tamaño de una partícula típica es de 20 μm . Sólo el 10% al 30% de la masa de las partículas es mayor que 45 μm . El área superficial es normalmente de 300 a 500 m^2/kg , a pesar de que algunas cenizas pueden tener área superficial tan baja como 200 m^2/kg o tan alta como 700 m^2/kg . Las cenizas volantes que no estén fuertemente compactadas presentan una masa unitaria (masa por unidad de volumen, incluyendo el aire entre las

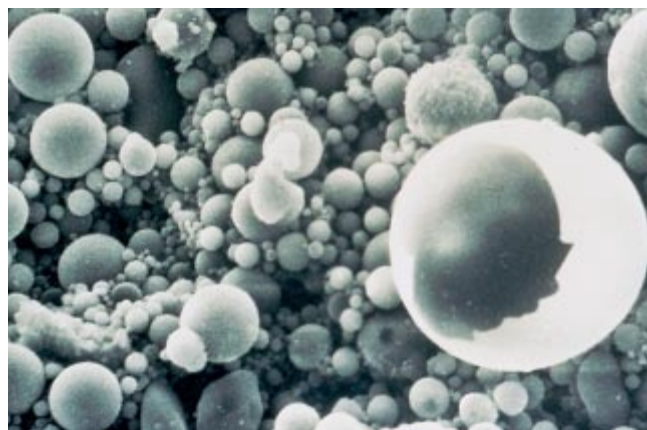


Fig. 3-2. Micrografía por microscopio electrónico de barrido (SEM) de partículas de ceniza volante con aumento de 1000X. A pesar de que la mayoría de las cenizas volantes son esferas sólidas, algunas partículas, llamadas cenosferas, son huecas (como se enseña en la micrografía). (IMG12309)



Fig. 3-3. La ceniza volante es un polvo que se parece con el cemento y ha sido usada desde los años 30. (IMG12190)



Fig. 3-4. La ceniza volante, escoria, arcilla calcinada o esquisto calcinado se emplean en la construcción en general, tal como (de la izquierda hacia la derecha) muros en edificios residenciales, pavimentos, rascacielos y presas (represas). (IMG12431, IMG12310, IMG12430, IMG12429)

partículas) que puede variar de 540 a 860 kg/m³ (34 a 54 lb/pies³), mientras que las cenizas compactadas o vibradas presentan masa unitaria que varía de 1120 a 1500 kg/m³ (70 a 94 lb/pies³).

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris o marrón.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de la ASTM C 618 (AASHTO M 295) se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal (Fig. 3-4). Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbono menor que 5%, pero algunas pueden contener hasta 10%. Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO) y contenido de carbono menor que 2%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes se encuadran en ambas Clases F y C.

La ceniza volante se emplea en cerca del 50% de los concretos premezclados de los Estados Unidos (PCA 2000). La ceniza volante Clase F se usa con una dosis del 15% al 25% de la masa del material cementante y la ceniza volante Clase C con una dosis del 15% al 40% de la masa del material cementante. La dosificación varía con la reactividad de la ceniza volante y con los efectos deseados en el concreto (Helmuth 1987 y ACI 232 1996).

ESCORIA

La escoria granulada de alto horno molida (Fig. 3-5), también llamada cemento de escoria, se produce de la escoria siderúrgica de alto horno, la cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Este producto se desarma en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca



Fig. 3-5. Escoria granulada de alto horno molida. (IMG12191)

de 1500°C (2730°F) se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45 µm, tiene un área superficial Blaine de 400 a 600 m²/kg. La masa específica relativa para la escoria granulada de alto horno molida es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375 kg/m³ (66 a 86 lb/pies³).

La escoria granulada es áspera y tiene forma angular (Fig. 3-6). En presencia del agua y de un activador, NaOH

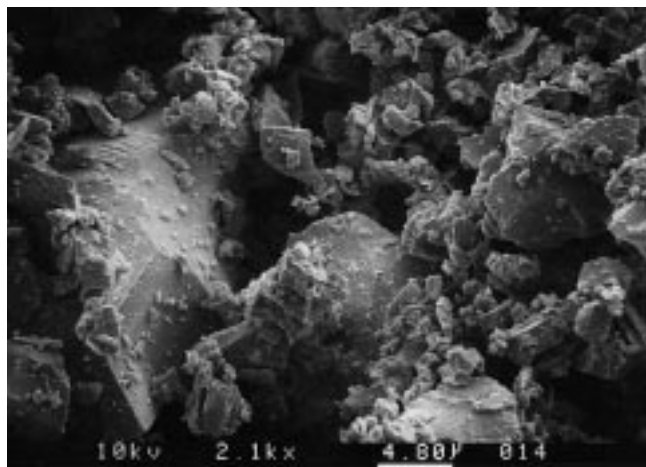


Fig. 3-6. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de escoria con aumento de 2100X. (IMG12428)

o CaOH, ambos suministrados por el cemento portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento portland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua.

La escoria granulada de alto horno fue desarrollada en Alemania en 1853 (Malhotra 1996) y se ha usado desde el inicio del siglo XX (Abrams 1925). La escoria granulada de alto horno molida, cuando es empleada en los concretos para uso general en los Estados Unidos, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla (Fig. 3-4) (PCA 2000), pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria. La ASTM C 989 (AASHTO M 302) clasifica la escoria por su nivel creciente de reactividad como grado 80, 100 o 120 (tabla 3-1). La ASTM C 1073 presenta un método para la determinación de la actividad hidráulica de la escoria granulada de alto horno molida y el ACI 233 (1995) presenta una amplia discusión sobre las escorias.

HUMO DE SÍLICE

El humo de sílice, también llamado de microsílíce, humo de sílice condensado o sílice activa, es un subproducto que se usa como una puzolana (Fig. 3-7). Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C (3620°F). Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en bolsas de tela enormes. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.

El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica (Fig. 3-8). Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1 mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1 μm , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.



Fig. 3-7. Polvo de humo de sílice. (IMG12192)

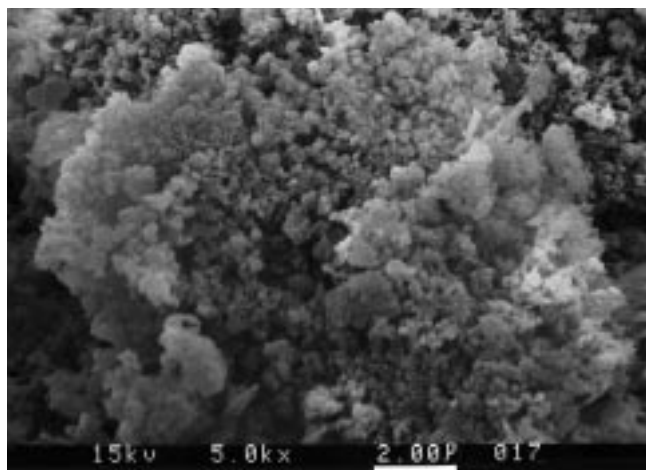


Fig. 3-8. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de humo de sílice con aumento de 20,000X. (IMG12311)

El área superficial del humo de sílice condensado es aproximadamente 20,000 m^2/kg (método de la adsorción de nitrógeno). Para efectos de comparación, el humo de tabaco tiene un área superficial de 10,000 m^2/kg . Los cementos ASTM tipos I y III tienen un área superficial de 300 m^2/kg a 400 m^2/kg y de 500 a 600 m^2/kg , respectivamente.

La masa específica relativa del humo de sílice es generalmente de 2.20 a 2.5, mientras que la masa específica relativa del cemento portland es cerca de 3.15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430 kg/m^3 (8 a 27 lb/pies^3).

El humo de sílice se vende en forma de polvo pero es más comúnmente encontrado en la forma líquida. El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad (Fig. 3-9) y alta resistencia del concreto. El humo de sílice sigue las normas ASTM C 1240, NTC 4637 y NTP 334.087, UNIT 1047. El ACI 234 (1994) y SFA (2000) presentan una amplia discusión sobre el humo de sílice.

PUZOLANAS NATURALES

Las puzolanas naturales se usan desde hace siglos. El término “puzolana” viene de una ceniza volcánica extraída en Pozzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia. Esta ceniza fue resultado de la erupción del Monte Vesuvio, en 79 DC. Sin embargo, el empleo de la ceniza volcánica y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 AC o tal vez antes. Muchas de las estructuras romanas, griegas, indianas y egipcias, producidas con concreto de puzolana, se las pueden visitar aún hoy, comprobando la durabilidad de estos materiales.

La experiencia americana con puzolanas naturales data del principio del siglo XX en proyectos de obras públi-

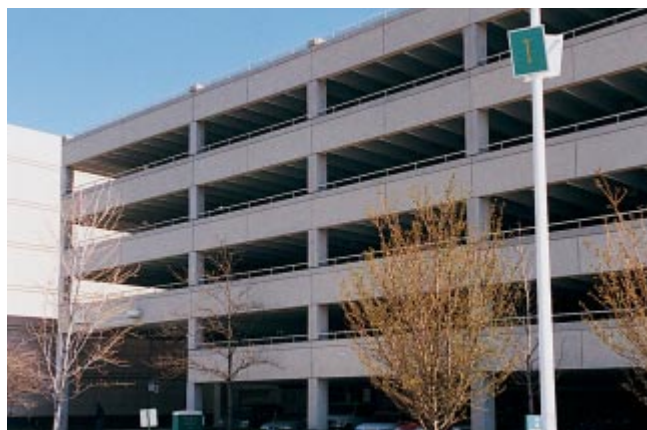


Fig. 3-9. A pesar de que el humo de sílice y la metacaolinita se indican para el uso de construcciones en general, normalmente estos materiales se emplean en aplicaciones tales como (izquierda) puentes y (derecha) garajes con la intención de disminuirse la penetración de cloruros en el concreto. (IMG12427, IMG12426)

cas, tales como presas, donde fueron utilizadas para controlar el aumento de la temperatura en concreto masivo y actuar como material cementante. Además del control del aumento de la temperatura, las puzolanas naturales se usan para mejorar la resistencia al ataque de sulfato y está entre los primeros materiales a controlar, comprobadamente, la reacción álcali-agregado.

Las puzolanas naturales más comúnmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperatura en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino (Fig. 3-10, 3-11 y 3-12). Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita.

Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas (Fig. 3-4). Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad

álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Su masa específica relativa es de 2.40 a 2.61 y su finura Blaine es de 650 m²/kg a 1350 m²/kg. El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del 1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante.

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolin de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un substituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento.

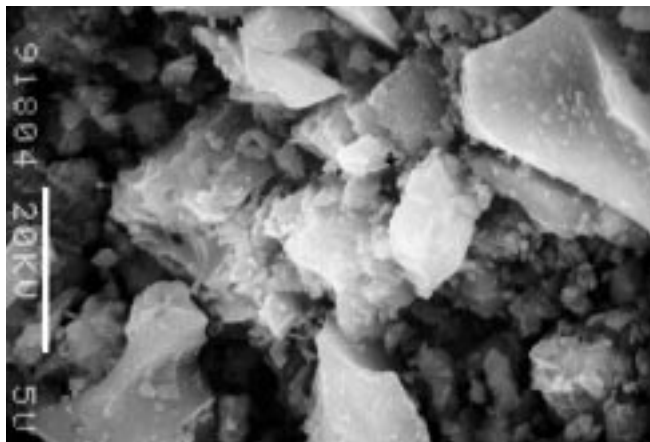


Fig. 3-10. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de esquisto calcinado con aumento de 5000X. (IMG12433)



Fig. 3-11. La metacaolinita es una arcilla calcinada. (IMG12193)

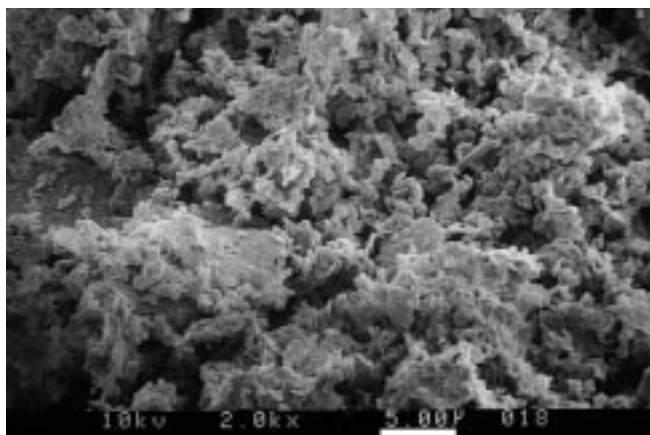


Fig. 3-12. Micrografía por microscopio electrónico de barrido de partículas de arcilla calcinada con aumento de 2000X. (IMG12432)

Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N (Tabla 3-1). El ACI 232 (2000) presenta una discusión sobre las puzolanas naturales. La Tabla 3-4 enseña el análisis químico típico y las propiedades seleccionadas de las puzolanas.

EFFECTOS EN EL CONCRETO FRESCO

Esta sección presenta una breve discusión a respecto de las propiedades del concreto fresco que se afectan por los materiales cementantes suplementarios, además de su grado de influencia. En primer lugar, se debe observar que el efecto de estos materiales sobre las mezclas de concreto

varía considerablemente. Los atributos de estos materiales, cuando adicionados separadamente a la mezcla de concreto, se los pueden encontrar también en los cementos adicionados con materiales cementantes suplementarios.

Demanda de Agua

Las mezclas de concreto que contienen ceniza volante requieren normalmente menos agua (cerca de 1% a 10% menos agua para dosis normales de cenizas) que un concreto que contenga sólo cemento portland, para un mismo asentamiento (revenimiento) del cono de Abrams. Dosis más altas de ceniza pueden resultar en reducciones mayores del agua (Tabla 3-5). Sin embargo, algunas cenizas volantes pueden aumentar la demanda de agua en hasta 5% (Gebler y Klieger 1986). La ceniza volante disminuye la demanda de agua de la misma manera que los reductores de agua químicos líquidos (Helmuth 1987). La escoria molida normalmente disminuye la demanda de agua del 1% al 10%, dependiendo de su dosis.

Cuanto mayor es la cantidad de humo de sílice, mayor la demanda de agua en el concreto, a menos que se use un reductor de agua o un plastificante. En algunas mezclas pobres puede no ocurrir un aumento de la demanda de agua, cuando se empleen pequeñas cantidades (menos del 5%) de humo de sílice.

Las arcillas calcinadas y los esquistos calcinados en dosis normales generalmente tienen poco efecto sobre la demanda de agua, pero otras puzolanas naturales pueden aumentar o disminuir considerablemente la necesidad de agua.

Tabla 3-4. Análisis Químico y Propiedades Seleccionadas de Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice, Arcilla Calcinada, Esquisto Calcinado y Metacaolinita Típicos

	Clase F (ASTM)	Clase C (ASTM)	Escoria granulada	Humo de sílice	Arcilla calcinada	Esquisto calcinado	Metacaolinita
SiO ₂ , %	52	35	35	90	58	50	53
Al ₂ O ₃ , %	23	18	12	0.4	29	20	43
Fe ₂ O ₃ , %	11	6	1	0.4	4	8	0.5
CaO, %	5	21	40	1.6	1	8	0.1
SO ₃ , %	0.8	4.1	9	0.4	0.5	0.4	0.1
Na ₂ O, %	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	—	0.05
K ₂ O, %	2.0	0.7	0.4	2.2	2	—	0.4
Total Na eq. alc, %	2.2	6.3	0.6	1.9	1.5	—	0.3
Pérdida por ignición	2.8	0.5	1.0	3.0	1.5	3.0	0.7
Finura Blaine, m ² /kg	420	420	400	20,000	990	730	19,000
Masa especí- fica relativa	2.38	2.65	2.94	2.40	2.50	2.63	2.50

Tabla 3-5. Efecto de la Ceniza Volante sobre la Demanda de Agua de Mezcla en Concretos con Aire Incluido (incorporado)

Identificación		Contenido de ceniza volante, % de la masa del material cementante	Cambio en el agua de mezcla necesaria comparada con el control
De la mezcla de ceniza volante	Clase de ceniza volante		
C1A	C	25	-6
C1D	F	25	-2
C1E	F	25	-6
C1F	C	25	-8
C1G	C	25	-6
C1J	F	25	-6
C2A	C	50	-18
C2D	F	50	-6
C2E	F	50	-14
C2F	C	50	-16
C2G	C	50	-12
C2J	F	50	-10

Todas las mezclas tenían un contenido de material cementante de 335 kg/m³ (565 lb/yd³), un asentamiento (revenimiento) del cono de Abrams de 125 ± 25 mm (5 ± 1 pulg.) y un contenido de aire de 6 ± 1%. La relación agua-cemento más ceniza volante ha variado de 0.40 a 0.48 (Whiting 1989).

Trabajabilidad

Ceniza volante, escoria, arcilla calcinada y esquistos calcinados normalmente mejoran la trabajabilidad de concretos con el mismo revenimiento (asentamiento). El humo de sílice puede contribuir para la cohesión de la mezcla del concreto. Algunos ajustes, tal como el uso de reductores de agua de alto rango, pueden ser necesarios para la manipulación de la trabajabilidad y para permitir la compactación y acabado adecuados.

Sangrado y Segregación

Los concretos con ceniza volante normalmente presentan menos sangrado (exudación) y segregación que el concreto convencional (Tabla 3-6). Este efecto es especialmente valioso, principalmente en mezclas producidas con agregados deficientes en finos. La reducción del agua exudada se debe principalmente por la disminución en la demanda de agua. Gebler y Klieger (1986) relacionan la reducción del agua exudada del concreto con la disminución de la demanda de agua en los morteros con ceniza volante.

Los concretos, conteniendo escoria molida con finura comparable a la finura del cemento, tienden a presentar un aumento tanto de la tasa como de la cantidad de sangrado, pero esto parece no tener ningún efecto adverso sobre la segregación. Las escorias más finas que el cemento disminuyen el sangrado.

El humo de sílice es muy efectivo en la reducción de ambas, el sangrado y la segregación, y, como resultado, se

pueden utilizar concretos con revenimiento (asentamiento) mayor. La arcilla calcinada, el esquistos calcinados y la meta-caolinita tienen poca influencia sobre el sangrado.

Tabla 3-6. Efecto de la Ceniza Volante sobre el Sangrado del Concreto (ASTM C 232, AASHTO T 158)*

Mezclas de ceniza volante		Sangrado (exudación)	
Identificación	Clase de la ceniza volante (ASTM)	Porcentaje	mL/cm ² **
A	C	0.22	0.007
B	F	1.11	0.036
C	F	1.61	0.053
D	F	1.88	0.067
E	F	1.18	0.035
F	C	0.13	0.004
G	C	0.89	0.028
H	R	0.58	0.022
I	C	0.12	0.004
J	F	1.48	0.051
Promedio de:			
Clase C		0.34	0.011
Clase F		1.31	0.044
Mezcla de control		1.75	0.059

* Todas las mezclas tenían un contenido de material cementante de 307 kg/m³ (517 lb/yd³), un asentamiento del cono de Abrams de 75 ± 25 mm (3 ± 1 pulg.) y un contenido de aire de 6 ± 1%. Las mezclas con ceniza volante contenían 25% de ceniza volante con relación a la masa de material cementante (Gebler y Klieger 1986).

** Volumen de agua exudada por área superficial.

Contenido de Aire

La cantidad de aditivo inclusor (incorporador) de aire necesaria para la obtención de una cantidad específica de aire incluido es normalmente mayor cuando se usa ceniza volante. La ceniza volante Clase C (ASTM C 618, AASHTO M 295) necesita de menos aditivo incorporador de aire que la ceniza volante Clase F (ASTM C 618, AASHTO M 295) y tiende a perder menos aire durante el mezclado (Tabla 3-7). La escoria molida tiene un efecto variable sobre la dosis necesaria de aditivo inclusor de aire. El humo de sílice tiene una influencia notable sobre los requisitos de aditivos inclusores de aire, aumentándolos rápidamente con el aumento de la cantidad de humo de sílice en el concreto. La adición de ambos, ceniza volante y humo de sílice en concretos sin aire incluido, normalmente reduce la cantidad de aire atrapado.

La cantidad de aditivo inclusor de aire necesaria para una cierta cantidad de aire en el concreto es en función de la finura, contenido de carbono, contenido de álcalis, contenido de material orgánico, pérdida por ignición y presencia de impurezas en la ceniza volante. El aumento de la cantidad de álcalis disminuye la dosis (dosificación) de aditivo incorporador de aire, mientras que el aumento de las otras propiedades, aumenta la demanda de dosis. El ensayo del índice de espuma provee una indicación de la demanda de dosis de los aditivos inclusores de aire para mezclas con ceniza volante con relación a mezclas sin ceniza. Se lo puede usar para anticipar la necesidad de aumento o disminución de la dosis, basado en los cambios del índice de espuma (Gebler y Klieger 1983).

La dosis del incorporador de aire y las características de retención de aire de concretos conteniendo escorias o puzolanas naturales son similares a las mezclas producidas sólo con cemento portland.

Calor de Hidratación

Las cenizas volantes, puzolanas naturales y escorias granu-
ladas tienen un calor de hidratación más bajo que el
cemento portland, consecuentemente su empleo reduce el
calor liberado en las estructuras de concreto (Fig. 3-13). La
arcilla calcinada libera un calor de hidratación similar al del
cemento de moderado calor de hidratación (Barrer y otros
1997). Algunas puzolanas liberan sólo 40% del calor de hi-
dratación de aquél del cemento ASTM tipo I. Esta reducción
en el aumento de la temperatura es especialmente benéfica
en el concreto usado en estructuras masivas. El humo de
sílice puede o no reducir el calor de hidratación. Detwiler y
otros (1996) ofrecen una discusión sobre el efecto de las
puzolanas y escorias sobre el calor de hidratación.

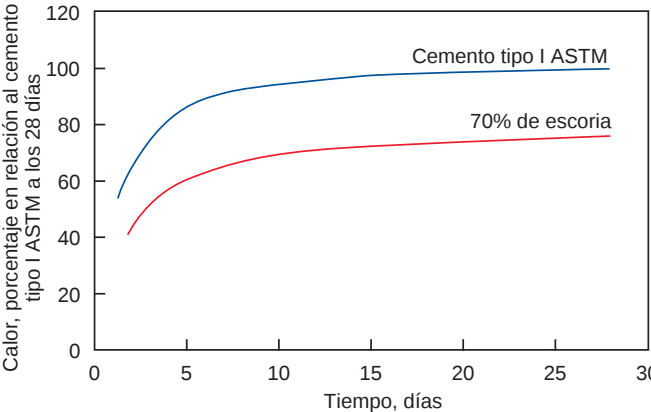


Fig. 3-13. Comparación del calor de hidratación a 20°C (68°F) entre la escoria y el cemento Tipo I (ASTM C 150).

Tabla 3-7. Efecto de la Ceniza Volante sobre la Dosis de Aditivo Inclusor de aire y sobre la Retención del Aire

Mezclas de ceniza volante		Porcentaje del aditivo inclusor de aire con relación al control	Contenido de aire, %			
Identification	Clase de la ceniza volante (ASTM)		Minutos después del mezclado inicial			
			0	30	60	90
A	C	126	7.2	6.0	6.0	5.8
B	F	209	5.3	4.1	3.4	3.1
C	F	553	7.0	4.7	3.8	2.9
D	F	239	6.6	5.4	4.2	4.1
E	F	190	5.6	4.6	4.3	3.8
F	C	173	6.8	6.5	6.3	6.4
G	C	158	5.5	4.8	4.5	4.2
H	R	170	7.6	6.9	6.5	6.6
I	C	149	6.6	6.5	6.5	6.8
J	F	434	5.5	4.2	3.8	3.4
Mezcla de control		100	6.6	6.0	5.6	5.3

Los concretos tenían un contenido de material cementante de 307 kg/m³ (517 lb/yd³), un revenimiento de 75 ± 25 mm (3 ± 1 pulg.) y un contenido de aire de 6 ± 1%. Las mezclas con ceniza volante contenían 25% de ceniza volante en relación a la masa de material cementante (Gebler y Klieger 1983).

Tiempo de Fraguado

El uso de ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida normalmente retarda el tiempo de fraguado (Tabla 3-8). El grado de retardo depende de factores como la cantidad de cemento portland, la demanda de agua, el tipo, la reactividad y la dosis de escoria o puzolana y la temperatura del concreto. El retardo del tiempo de fraguado puede ser una ventaja en clima caluroso, permitiendo más tiempo para la colocación y el acabado del concreto. Sin embargo, en el clima frío, puede ocurrir un retardo grande con ciertos materiales, retardando considerablemente las operaciones de acabado. Se pueden usar los aditivos aceleradores para disminuir el tiempo de fraguado. Las arcillas y esquistos calcinados tienen poco efecto sobre el tiempo de fraguado.

Acabado

El concreto que contiene materiales cementantes suplementarios se puede acabar de manera igual o más fácil que el concreto sin material cementante suplementario. Las mezclas que contienen cantidades altas de estos materiales, especialmente humo de sílice, pueden ser pegajosas y difíciles de acabar.

Bombeabilidad

El uso de materiales cementantes suplementarios generalmente ayuda a la bombeabilidad del concreto. El humo de sílice es el material más eficiente, especialmente en mezclas pobres.

Fisuración por Contracción Plástica

Debido a su bajo sangrado (exudación), el concreto con humo de sílice puede presentar un aumento de la fisuración por contracción (retracción) plástica (agrietamiento por contracción plástica). Se puede evitar este problema garantizándose que el concreto esté protegido de la desecación, tanto durante como después del acabado. Otras puzolanas y escorias tienen normalmente poco efecto sobre el agrietamiento por contracción plástica. Los materiales cementantes suplementarios que aumentan significativamente el tiempo de fraguado pueden aumentar los riesgos de la fisuración por contracción plástica.

Curado

Los efectos de las condiciones de temperatura y humedad, sobre las propiedades de fraguado y desarrollo de resistencia de los concretos con materiales cementantes suplementarios, son similares a sus efectos sobre el concreto producido sólo con cemento portland. Sin embargo, el tiempo de fraguado necesita ser mayor para ciertos materiales con desarrollo de resistencia temprana lento.

Cantidades elevadas de humo de sílice pueden producir concretos con muy alta cohesión, baja segregación de los agregados y bajo sangrado (exudación). Como hay poca o ninguna agua de sangrado disponible para la evaporación sobre la superficie del concreto, la fisuración plástica se puede desarrollar rápidamente, especialmente en clima caluroso, días ventosos, si no se toman precauciones especiales.

Tabla 3-8. Efecto de la Ceniza Volante sobre el Tiempo de Fraguado del Concreto

Mezclas de ceniza volante		Tiempo de fraguado, hr:min		Retraso con relación al control, hr:min	
Identificación	Clase de la ceniza volante (ASTM)	Inicio	Fin	Inico	Fin
A	C	4:30	5:35	0:15	0:05
B	F	4:40	6:15	0:25	0:45
C	F	4:25	6:15	0:10	0:45
D	F	5:05	7:15	0:50	1:45
E	F	4:25	5:50	0:10	0:20
F	C	4:25	6:00	0:10	0:30
G	C	4:55	6:30	0:40	1:00
H	R	5:10	7:10	0:55	1:40
I	C	5:00	6:50	0:45	1:20
J	F	5:10	7:40	0:55	2:10
Promedio de:					
Clase C		4:40	6:15	0:30	0:45
Clase F		4:50	6:45	0:35	1:15
Mezcla de control		4:15	5:30	—	—

Los concretos tenían un contenido de material cementante de 307 kg/m³ (517 lb/yd³) y las mezclas con ceniza volante contenían 25% de ceniza volante con relación a la masa de material cementante. La relación agua-cemento más ceniza volante era de 0.40 a 0.45. Los ensayos se realizaron a una temperatura de 23°C (Gebler y Klieger 1986).

El curado adecuado del concreto, especialmente de aquéllos conteniendo materiales cementantes suplementarios, debe empezar inmediatamente después del acabado. El curado húmedo por siete días o el curado con membranas es adecuado para los concretos con cantidades normales de la mayoría de los materiales cementantes suplementarios. De la misma manera que ocurre en el concreto con cemento portland, el curado con bajas temperaturas puede reducir el desarrollo de la resistencia temprana (Gebler y Klieger 1986).

EFFECTOS SOBRE EL CONCRETO ENDURECIDO

Resistencia

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno molida, la arcilla calcinada, la metacaolinita, el esquistos calcinado y el humo de sílice contribuyen para el aumento de la resistencia del concreto. Sin embargo, la resistencia del concreto con estos materiales puede ser tanto mayor como menor que la resistencia del concreto que contenga sólo cemento portland. La Figura 3-14 muestra esto para diversas cenizas volantes. La resistencia a tracción, a flexión, a torsión y de adherencia se afectan de la misma manera que la resistencia a compresión.

Debido a la reacción puzolánica lenta de ciertos materiales cementantes suplementarios, el curado húmedo continuo y con temperaturas favorables puede ser necesario por periodos más largos que los normalmente

requeridos. Sin embargo, esto afecta menos el concreto que contiene humo de sílice, cuya resistencia normalmente se iguala o supera la resistencia a un día de la mezcla de control con sólo cemento portland. El humo de sílice contribuye para el desarrollo de la resistencia principalmente entre 3 y 28 días, cuando la resistencia del concreto con humo de sílice excede la resistencia de la mezcla con sólo cemento portland. El humo de sílice también ayuda el desarrollo de la resistencia de concretos con ceniza volante.

El desarrollo de la resistencia del concreto con ceniza volante, escoria granulada, arcilla calcinada o esquistos calcinado es similar al concreto normal si es curado a una temperatura de aproximadamente 23°C (73°F). La Figura 3-15 muestra que la tasa de desarrollo de resistencia, con relación a la resistencia a los 28 días, del concreto con ceniza volante es similar a la tasa del concreto sin ceniza volante. Los concretos producidos con algunas cenizas volantes altamente reactivas (especialmente las cenizas tipo C, con alto contenido de calcio) o escorias granuladas pueden igualar o exceder la resistencia de control de 1 a 28 días. Algunas cenizas volantes y puzolanas naturales requieren de 28 a 90 días para exceder la resistencia de control a los 28 días, dependiendo de las proporciones de la mezcla. Los concretos conteniendo cenizas Clase C (ASTM C 618, AASHTO M 295) normalmente desarrollan resistencia temprana mayor que los concretos con cenizas Clase F (ASTM C 618, AASHTO M 295).

Se puede mejorar el desarrollo de la resistencia del concreto: (1) aumentando la cantidad del material cementante del concreto; (2) adicionando materiales cementantes de alta resistencia inicial; (3) disminuyendo la relación agua-material cementante; (4) aumentando la temperatura de curado o (5) empleando un aditivo acelerador. La Figura 3-16 muestra el beneficio del uso de ceniza volante en vez de la sustitución del cemento con relación al desarrollo de resistencia el clima frío. El diseño de concreto masivo

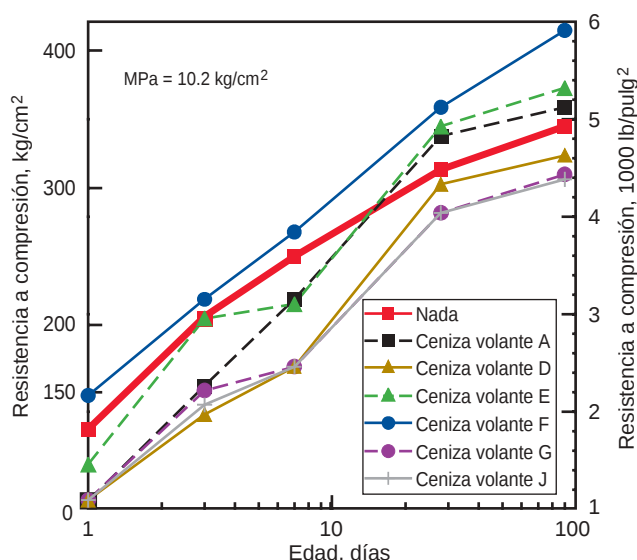


Fig. 3-14. Desarrollo de la resistencia a compresión a 1, 3, 7, 28 y 90 días de edad de mezclas de concreto conteniendo 307 Kg/m³ (517 lb/yd³) de materiales cementantes, de los cuales 25% de la masa es ceniza volante (Whiting 1989).

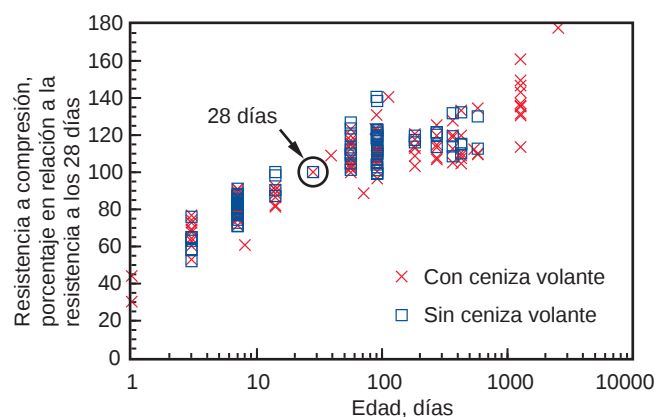


Fig. 3-15. Aumento de la resistencia a compresión como porcentaje de la resistencia a compresión a los 28 días de concretos con y sin ceniza volante (Lange 1994).

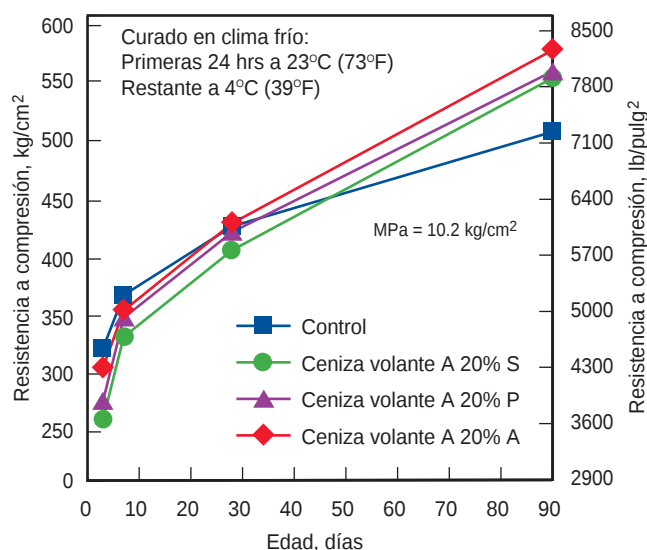


Fig. 3-16. Resistencias a compresión de concretos curados a 23°C (73°F) durante las primeras 24 horas y curados a 4°C (40°F) durante el resto del tiempo. El concreto de control tenía un contenido de cemento de 322 Kg/m³ (560 lb/yardas³) y una relación a/c de 0.45. Las curvas de ceniza volante muestran sustitución por cemento (S), sustitución parcial (igual) por cemento y arena y adición de ceniza volante con relación a la masa de cemento (A). La sustitución parcial del cemento o la adición de ceniza volante presentan desarrollo de resistencia similar a la mezcla de control que posee sólo cemento, incluso en clima frío (Detwiler 2000).

frecuentemente se aprovecha del retraso del desarrollo de la resistencia de las puzolanas, pues estas estructuras no se las pone en servicio inmediatamente. El desarrollo lento de la resistencia temprana que resulte del uso de materiales cementantes suplementarios es una ventaja en la construcción en clima caluroso, pues da más tiempo para la colocación y el acabado del concreto. Con los ajustes adecuados de la mezcla, se pueden utilizar todos los materiales cementantes suplementarios en todas las estaciones.

Los materiales cementantes suplementarios son esenciales para la producción de los concretos de alta resistencia. La ceniza volante se usa principalmente para la producción de concreto con resistencias de hasta 1000 kg/cm² o 100 MPa (15,000 lb/pulg²). Los productores de concreto premezclado pueden, hoy en día, producir concretos con hasta 1400 kg/cm² o 140 MPa (20,000 lb/pulg²), con el empleo de humo de sílice, reductores de agua de alto rango y agregados adecuados (Burg y Ost 1994).

Resistencia al Impacto y a la Abrasión

La resistencia a abrasión y al impacto del concreto se relacionan con la resistencia a compresión y el tipo de agregado. Los materiales cementantes suplementarios normalmente no afectan estas propiedades tanto como afectan la resis-

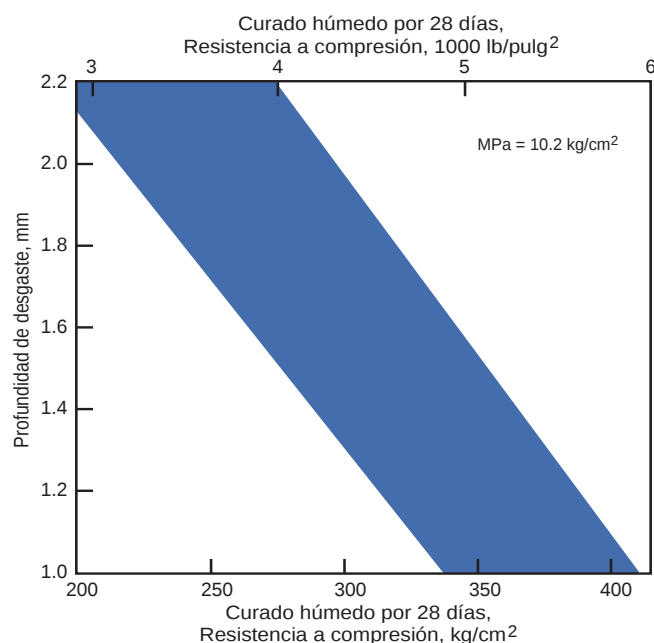


Fig. 3-17. Comparación de la resistencia a abrasión y de la resistencia a compresión de varios concretos con 25% de ceniza volante. La resistencia a abrasión aumenta con el aumento de resistencia a compresión (Gebler y Klieger 1986).

cia. Concretos que contienen ceniza volante son tan resistentes a la abrasión cuanto un concreto de cemento portland sin ceniza (Gebler y Klieger 1986). La Figura 3-17 ilustra que la resistencia a abrasión de concretos con ceniza volante se relaciona con la resistencia a compresión.

Resistencia a Congelación-Deshielo

Es imprescindible que, para el desarrollo de la resistencia al deterioro por ciclos de congelación-deshielo, el concreto tenga adecuada resistencia y cantidad de aire incluido. Para que el concreto con material cementante suplementario presente la misma resistencia a los ciclos de congelación-deshielo de un concreto que contenga sólo cemento portland, los dos tipos de concreto deben respetar cuatro condiciones:

1. Deben tener la misma resistencia a compresión.
2. Deben tener una cantidad adecuada de aire incluido, con características apropiadas de vacíos de aire.
3. Se deben curar adecuadamente.
4. Se deben secar al aire un mes antes de su exposición a las condiciones de congelación.

La Tabla 3-9 muestra una resistencia a la congelación igual en concretos con y sin ceniza volante. La Figura 3-18 muestra la durabilidad a largo plazo de concretos con ceniza volante, escoria o esquistos.

Tabla 3-9. Resistencia a la Congelación y a los Descongelantes de Concretos con Ceniza Volante

Mezclas de ceniza volante		Resultados en 300 ciclos				
		Resistencia al congelamiento en agua, ASTM C 666 Método A (AASHTO T 161)			Resistencia al descascaramiento por sales ASTM C 672**	
Identificación	Clase de la volante (ASTM)	Expansión, %	Pérdida de masa, %	Factor de durabilidad	Curado con agua	Compuesto de curado
A	C	0.010	1.8	105	3	2
B	F	0.001	1.2	107	2	2
C	F	0.005	1.0	104	3	3
D	F	0.006	1.3	98	3	3
E	F	0.003	4.8	99	3	2
F	C	0.004	1.8	99	2	2
G	C	0.008	1.0	102	2	2
H	F	0.006	1.2	104	3	2
I	C	0.004	1.7	99	3	2
J	F	0.004	1.0	100	3	2
Promedio de:						
Clase C		0.006	1.6	101	3	2
Clase F		0.004	1.8	102	3	2
Mezcla de control		0.002	2.5	101	2	2

* Los concretos tenían un contenido de material cementante de 307 kg/m³ (517 lb/yard³) y la relación agua-material cementante era de 0.40 a 0.45, un contenido de aire incluido de 5% a 7% y un asentamiento (revenimiento) de 75 mm a 100 mm (3 pulg. a 4 pulg.). El contenido de ceniza volante era de 25% de la masa del material cementante (Gebler y Klieger 1986a).

** Grado de descascaramiento (consulte a la derecha)

- 0 = sin descascaramiento
- 1 = descascaramiento ligero
- 2 = descascaramiento de ligero a moderado
- 3 = descascaramiento moderado
- 4 = descascaramiento de moderado a severo
- 5 = descascaramiento severo



(IMG12330)

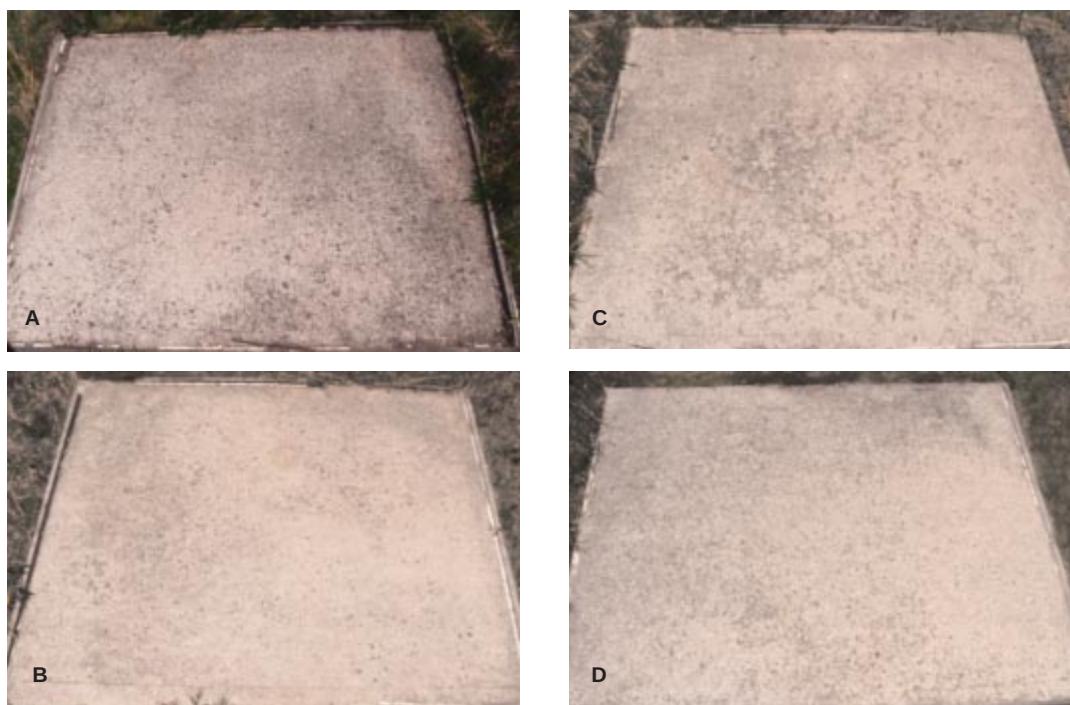


Fig. 3-18. Vista de losas de concreto en el área externa de pruebas de la PCA (Skokie, Illinois) conteniendo (A) ceniza volante, (B) escoria, (C) esquistos calcinados y (D) cemento Portland después de una exposición a sales anticongelantes y congelación de 30 años. Estas muestras enseñan la durabilidad del concreto con varios tipos de material cementante. Fuente: RX 157, Cemento LTS No. 51, losas con 335 Kg/m³ (564 lb/yardas³) de material cementante y aire incluido. (IMG12336, IMG12334, IMG12335, IMG12333)

Resistencia a Sales Descongelantes

Décadas de experiencia en campo han demostrado que los concretos con aire incluido, que contienen cantidades normales de ceniza volante, escoria, humo de sílice, arcilla calcinada o esquistos calcinados, son resistentes al descascamiento causado por la aplicación de sales descongelantes (anticongelantes) en un ambiente de congelación-deshielo. Las pruebas de laboratorio indican que la resistencia a los descongelantes del concreto producido con materiales cementantes suplementarios es normalmente igual a la resistencia del concreto sin material cementante suplementario.

La resistencia al descascamiento puede disminuir con el aumento del contenido de ciertos materiales cementantes suplementarios. Sin embargo, los concretos diseñados, colocados y curados adecuadamente han demostrado buena resistencia al descascamiento aun cuando son producidos con altas cantidades de estos materiales.

La resistencia al descascamiento de todos los concretos se mejora significativamente con el uso de baja relación agua-cemento, un contenido moderado de cemento por-

tland, una cantidad adecuada de aire incluido, acabado y curado apropiados y un periodo de secado al aire antes de la exposición del concreto a las sales y a las temperaturas de congelación. El concreto pobre con contenido de material cementante de 240 kg/m^3 (405 lb/yd^3) o menos puede ser especialmente vulnerable a los descongelantes y al descascamiento. Se recomienda un contenido mínimo de material cementante de 335 kg/m^3 (564 lb/yd^3) y una relación agua-materiales cementantes máxima de 0.45. Un sistema de vacíos de aire satisfactorio también es un factor crítico.

La importancia del uso de bajas relaciones agua-cemento para la resistencia al descascamiento se presenta en la Figura 3-19. El efecto de altas cantidades de cenizas volantes y bajos contenidos de material cementante se muestra en la Figura 3-20. El desempeño de concretos resistentes al descascamiento conteniendo 25% de ceniza volante (con relación a la masa del material cementante) se presenta en la Tabla 3-9. La tabla muestra que los concretos bien diseñados, colados y curados con y sin ceniza volante son igualmente resistentes a los descongelantes.

El código de construcción ACI 318 (Building Code) declara que el contenido máximo de ceniza volante, escoria y humo de sílice debe ser 25%, 50% y 10% de la masa del material cementante, respectivamente para exposición a descongelantes. Cantidades mayores o menores que estos límites se mostraron durables en algunos casos y no durables en otros. Diferentes materiales responden de manera diversa a los ambientes. La selección de los materiales y de las proporciones se debe basar en la experiencia local y se debe comprobar la durabilidad a través del desempeño en campo o en laboratorio.

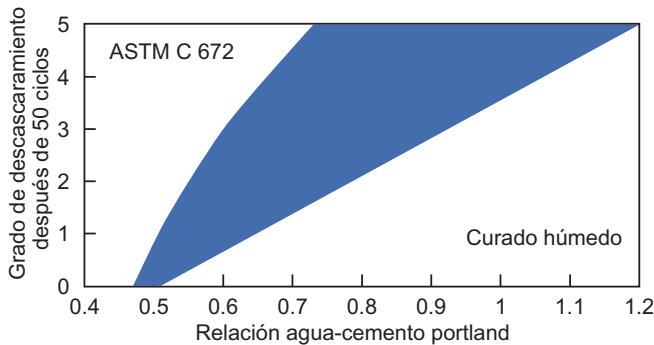


Fig. 3-19. Relación entre la resistencia al descascamiento por descongelantes y la relación agua-cemento de varios concretos con aire incluido con y sin ceniza volante. El grado 0 en la escala significa que no hubo descascamiento y el grado 5 significa descascamiento severo (Whiting 1989).

Contracción por Secado y Fluencia

Cuando se usan en pequeñas cantidades, el efecto de la ceniza volante, escoria granulada de alto horno molida, arcilla calcinada, esquistos calcinados y humo de sílice sobre la contracción por secado y la fluencia del concreto es

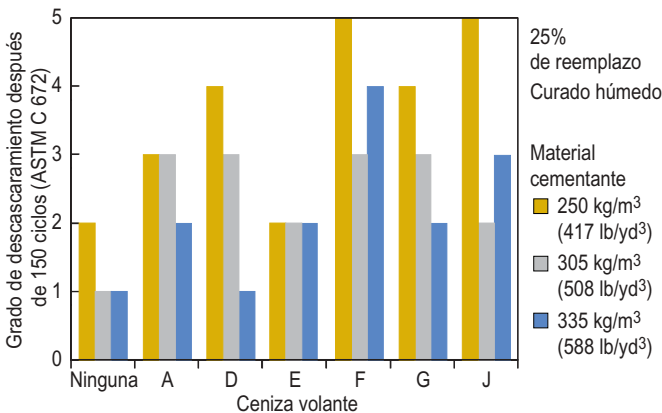


Fig. 3-20. Relación entre la resistencia al descascamiento por descongelantes y la cantidad de ceniza volante en concretos con aire incluido, producidos con relaciones agua-material cementante que varían de medianas a altas. Reemplazo de cemento portland por ceniza volante: (izquierda) 25% y (derecha) 50%. El grado 0 en la escala significa que no hubo descascamiento y el grado 5 significa descascamiento severo (Whiting 1989).

generalmente pequeño y tiene poco significado práctico. Algunos estudios indican que el humo de sílice puede reducir la fluencia (Burg y Ost 1994).

Permeabilidad y Absorción

Ceniza volante, escoria molida y puzolana natural generalmente reducen la permeabilidad y la absorción del concreto bien curado. El humo de sílice y la metacaolinita son especialmente eficientes en este sentido. El humo de sílice y la arcilla calcinada pueden producir un concreto con resistencia a los sulfatos de 1000 Coulombs, usando el ensayo acelerado de permeabilidad a cloruros ASTM C 1202 (Barrer y otros 1997). Las pruebas demuestran que la permeabilidad de los concretos disminuye a medida que la cantidad de material cementante hidratado aumenta y a medida que la relación agua-material cementante disminuye. La absorción del concreto con ceniza volante es prácticamente la misma del concreto sin ceniza, a pesar que algunas cenizas pueden reducir la absorción en 20% o más.

Reactividad Álcali-Agregado

La reactividad álcali-agregado se puede controlar a través del empleo de ciertos materiales cementantes suplementarios. El humo de sílice, la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, la arcilla calcinada, el esquisto calcinado y otras puzolanas pueden reducir considerablemente la reacción álcali-sílice (Fig. 3-21 y 3-22). Las cenizas de bajo

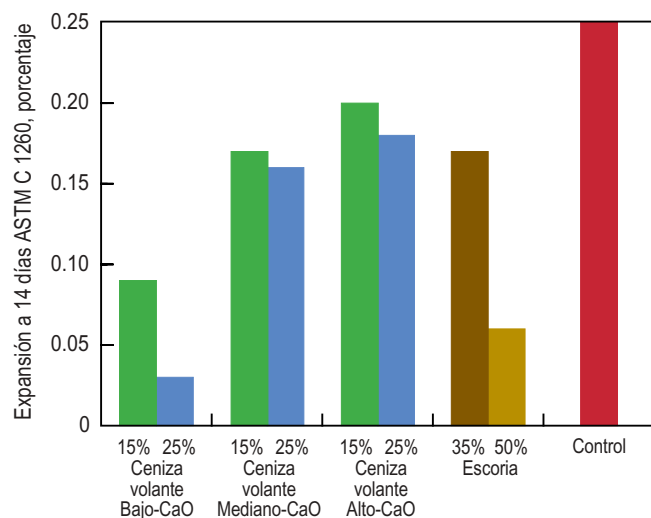


Fig. 3-21. Efecto de diferentes cenizas volantes y escorias sobre la reactividad álcali-sílice. Observe que algunas cenizas volantes son más eficientes que otras en el control de la reacción y que la cantidad de ceniza volante y escoria es un factor crítico. Se ha empleado un agregado natural altamente reactivo en este ensayo. Un agregado menos reactivo necesitaría menos ceniza o escoria para el control de la reacción. Un límite usual para la evaluación de la eficiencia de puzolanas o escorias es 0.10% de expansión en el método de ensayo acelerado en barras de mortero (Detwiler 2002).

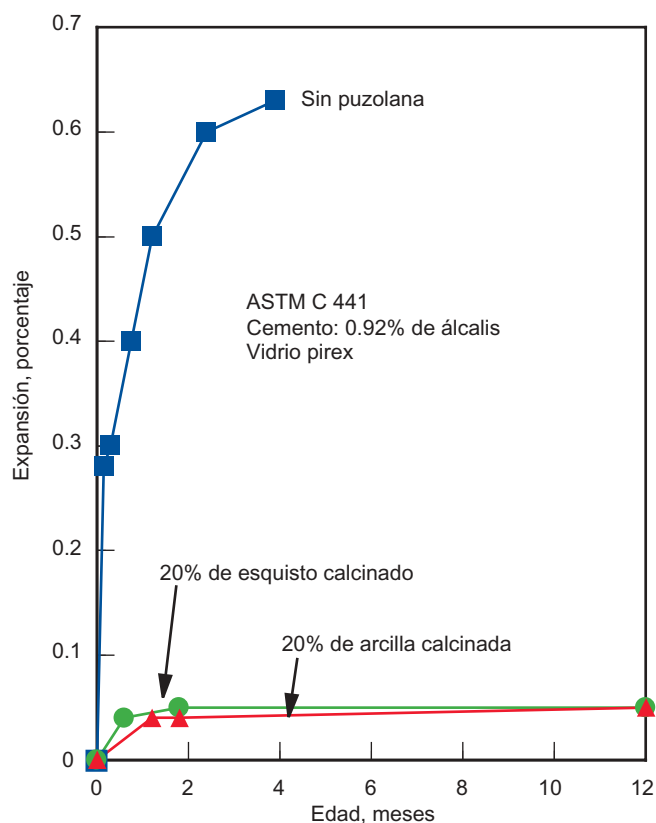


Fig. 3-22. Reducción de la reactividad álcali-sílice por la arcilla calcinada y el esquisto calcinado (Lerch 1950).

contenido de calcio F (ASTM C 618, AASHTO M 295) han reducido, en algunos casos, en más del 70% la expansión por la reactividad. Con una cantidad óptima, las cenizas Clase C (ASTM C 618, AASHTO M 295) también pueden reducir la reactividad, pero en un grado menor que las cenizas de la Clase F. Los materiales cementantes suplementarios proveen hidratos de silicato de calcio adicionales para fijar los álcalis en el concreto (Bhatty 1985 y Bhatty y Greening 1986). La determinación de la dosificación óptima del material cementante suplementario es importante para maximizar la reducción de la reactividad y para evitar dosificaciones y materiales que pueden agravar la reactividad. La dosificación debe ser verificada a través de ensayos, tales como: ASTM C 1260 (AASHTO T 303), ASTM C 1293, NTP 334.117 y UNIT 1038.

Los materiales cementantes suplementarios que reducen la reacción álcali-sílice no reducen la reacción álcali-carbonato, que es un tipo de reacción que envuelve los álcalis del cemento y ciertos calcáreos dolomíticos.

Resistencia a los Sulfatos

Con una correcta dosificación y selección de materiales, el humo de sílice, la ceniza volante, el esquisto calcinado y la escoria granulada pueden mejorar la resistencia del concreto al ataque de sulfatos o al agua de mar. Esto ocurre

principalmente por la disminución de la permeabilidad y por la reducción de la cantidad de elementos reactivos (tal como el calcio) necesarios para las reacciones expansivas del sulfato. En concretos pobres, un estudio ha mostrado que para una ceniza particular de la Clase F (ASTM C 618, AASHTO M 295), la cantidad adecuada de ceniza para la mejoría de la resistencia a los sulfatos fue 20% del cemento más la ceniza volante. Los contenidos elevados de ceniza volante presentaron un efecto perjudicial sobre el concreto, lo que ilustra la necesidad de determinarse el contenido óptimo de ceniza (Stark 1989).

La resistencia a los sulfatos de concretos con alto contenido de cemento y baja relación agua-cemento producidos con cementos resistentes a sulfatos es tan grande que las cenizas volantes tienen poca oportunidad de mejorar tal resistencia. Los concretos con ceniza Clase F son normalmente más resistentes a los sulfatos que aquellos producidos con ceniza Clase C. Algunas cenizas Clase C han reducido la resistencia a los sulfatos en dosificaciones normales.

La escoria molida es generalmente considerada beneficiosa en ambientes con sulfatos. Sin embargo, un estudio a largo plazo en un ambiente muy severo mostró una pequeña reducción de la resistencia a los sulfatos en concretos conteniendo escoria molida si son comparados con concretos conteniendo sólo cemento portland (Stark 1986 y 1989). Una razón para la disminución del desempeño con la escoria es que, en este estudio, las mezclas probablemente no fueron optimizadas para la resistencia a los sulfatos.

Otros estudios indican que el concreto con escoria molida tiene una resistencia a los sulfatos igual o mayor que el concreto producido con el cemento portland resistente a sulfatos tipo V (ASTM C 150) (ACI 233 y Detwiler, Bhatt y Bhattacharja 1996). La arcilla calcinada ha mostrado una resistencia mayor que el cemento resistente a sulfatos tipo V (Barrer y otros 1997).

Corrosión de la Armadura

Algunos materiales cementantes suplementarios reducen la corrosión de la armadura (refuerzo) a través de la reducción de la permeabilidad a agua, aire y iones cloruro de concretos adecuadamente curados. La ceniza volante puede reducir considerablemente la entrada de los iones cloruro. El humo de sílice disminuye grandemente la permeabilidad y la entrada de iones cloruro y también aumenta la resistividad eléctrica y, de esta forma, disminuye la reacción electroquímica de corrosión. El concreto conteniendo humo de sílice o metacaolinita se usa normalmente en revestimiento y losas de puentes y garajes. Estas estructuras son particularmente susceptibles a la corrosión por la entrada de iones cloruro.

Carbonatación

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reac-

ciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio, para formar carbonatos. En la reacción con el hidróxido de calcio se forma carbonato de calcio. La carbonatación baja la alcalinidad del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para proteger la armadura (refuerzo) de la corrosión. De esta manera, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para ayudar a prevenir la corrosión.

La cantidad de carbonatación es ampliamente aumentada en concretos con relación agua-material cementante alta, bajo contenido de cemento, periodo de curado corto, baja resistencia y pasta altamente permeable o porosa. La profundidad de carbonatación de un concreto de buena calidad es normalmente de poca importancia práctica. La ceniza volante en dosificación normal ha aumentado ligeramente la carbonatación, pero no en gran cantidad en concretos con periodos de curado húmedo corto (normal) (Campbell, Sturm y Kosmatka 1991).

Resistencia Química

Los materiales cementantes suplementarios frecuentemente reducen el ataque químico por la reducción de la permeabilidad del concreto. Aunque muchos de estos materiales aumenten la resistencia química, los concretos pueden no estar completamente inmunes al ataque. El concreto expuesto a condiciones químicas severas se lo debe proteger con sistemas de barrera. Kerkhoff (2001) presenta una discusión sobre los métodos y los materiales para la protección del concreto contra la exposición severa y los productos químicos agresivos.

Sanidad

Dosificaciones normales de ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales no afectan la sanidad del concreto, que se protege por los requisitos de sanidad de los materiales, tales como límites de expansión en autoclave. La dosificación en el concreto no debe exceder la dosificación estimada como segura en los ensayos de autoclave.

Color del Concreto

Los materiales cementantes suplementarios pueden alterar ligeramente el color del concreto endurecido. Los efectos del color se relacionan con el color y la cantidad del material empleado en el concreto. Muchos materiales cementantes suplementarios se parecen con el color del cemento portland y por lo tanto tienen poco efecto en el color del concreto. Algunos humos de sílice dan un color azulado o agrisado oscuro cuando son usados en grandes cantidades. La escoria molida y la metacaolinita pueden dar un color blanqueado al concreto. La escoria molida puede dar inicialmente un color azulado o verdoso.

PROPORCIONAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

La cantidad óptima del material cementante suplementario usado con el cemento portland o con el cemento adicionado se determina a través de pruebas, en función del costo relativo y disponibilidad de los materiales y de las propiedades especificadas del concreto.

Se necesitan varias mezclas de ensayo para determinarse la cantidad óptima de puzolana o escoria. Estas mezclas deben cubrir una gama de combinaciones para establecerse la correlación entre resistencia y relación agua-material cementante. Estas mezclas se deben establecer de acuerdo con el ACI Standard 211.1 y 211.2, considerándose las masas específicas relativas de los materiales cementantes suplementarios. Éstas normalmente son diferentes de la masa específica relativa del cemento portland. Los resultados de los ensayos dan origen a una familia de curvas de resistencia para cada edad en la cual el concreto debe obedecer a ciertos requisitos especificados. La dosificación del material cementante suplementario normalmente se expresa como un porcentaje de todos los materiales cementantes en la mezcla de concreto.

El uso de ceniza volante, escoria, humo de sílice, arcilla calcinada o esquistos calcinados como una adición al cemento portland o como sustituto parcial del cemento portland es una práctica común en los Estados Unidos y algunos países de Latinoamérica. Los cementos adicionales que ya poseen puzolana o escoria se diseñan para que se usen con o sin materiales cementantes suplementarios adicionales.

Las mezclas de concreto con más de un material cementante suplementario también se usan. Por ejemplo, una mezcla de concreto puede contener cemento portland, ceniza volante y humo de sílice. Estas mezclas se llaman mezclas ternarias. Cuando la ceniza volante, la escoria, el humo de sílice o las puzolanas naturales se emplean en combinación con el cemento portland o el cemento adicionado, se debe probar la mezcla de concreto para demostrar si satisface a las propiedades del concreto necesarias en el proyecto.

DISPONIBILIDAD

No todos los materiales cementantes suplementarios están disponibles en todas las regiones. Consulte a los proveedores sobre los materiales disponibles.

ALMACENAMIENTO

En la mayoría de los casos, la humedad no afecta el desempeño físico de los materiales cementantes suplementarios. Sin embargo, se los debe mantener secos para evitar dificultades de manejo y descarga. La ceniza Clase C y el esquistos calcinados se deben mantener secos pues en con-

tacto con la humedad se fraguan y se endurecen. Los aparatos para manejo y almacenamiento de estos materiales son similares a aquéllos usados para el cemento. Modificaciones adicionales pueden ser necesarias cuando se usa humo de sílice, pues no tiene las mismas características de los otros materiales cementantes suplementarios y su abastecimiento puede ser en líquido.

Estos materiales normalmente se mantienen en instalaciones de almacenamiento a granel o silos, a pesar de que ciertos materiales están disponibles en bolsas. Como estos materiales se parecen al cemento portland en cuanto al color y a la finura, las instalaciones de almacenamiento se deben marcar claramente para evitar la posibilidad del uso indebido y de la contaminación con otros materiales en la planta de mezclado. Todas las válvulas y tuberías se deben marcar claramente y se deben sellar adecuadamente para evitar vaciamiento y contaminación. La ceniza volante, la escoria y las puzolanas naturales se deben pesar después del cemento portland o del cemento adicionado en la secuencia del mezclado para evitarse una sobredosis en caso de que las válvulas se obstruyan.

REFERENCIAS

AASHTO, *Guide Specification on Alkali-Silica Reaction (Especificación sobre las reacción Álcali-Sílice)*, Section 56, <http://leadstates.tamu.edu/ASR/library/gspec.stm>, 2000.

Abrams, Duff A., "Effect of Hydrated Lime and Other Powdered Admixtures in Concrete (Efecto de la Cal Hidratada y de Otros Aditivos Minerales en el Concreto)," *Proceedings of the American Society for Testing Materials*, Vol. 20, Part 2, 1920. Reprinted with revisions as Bulletin 8, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Junio 1925, 78 páginas. Disponible a través de la PCA como LS08.

ACAA, <http://www.aaa-usa.org>, American Coal Ash Association, Alexandria, Virginia, 2001.

ACI, *Concrete Durability (Durabilidad del Concreto)*, Katherine and Bryant Mather International Conference, SP100, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1987.

ACI Committee 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Práctica Estándar para la Elección de las Proporciones de los Concretos Normal, Pesado y Masivo)*, ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1991, 38 páginas.

ACI Committee 211, *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (Práctica Estándar para la Elección de las Proporciones de los Concretos Normal, Pesado y Masivo)*, ACI 211.2-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1998, 14 páginas.

ACI Committee 211, *Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash* (Guía para la Elección de las Proporciones del Concreto de Alta Resistencia con Cemento Portland y Ceniza Volante), ACI 211.4R-93, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1993, 13 páginas.

ACI Committee 232, *Use of Fly Ash in Concrete* (Uso de la Ceniza Volante en el Concreto), ACI 232.2R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1996, 34 páginas.

ACI Committee 232, *Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete* (Uso de Puzolana Cruda o Puzolana Natural Procesada en el Concreto), ACI 232.1R-00, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2001, 24 páginas.

ACI Committee 233, *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete* (Escoria Granulada de Alto Horno Molida como un Material Componente en el Concreto), ACI 233R-95, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1995, 18 páginas.

ACI Committee 234, *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete* (Guía para el uso del Humo de Sílice en el Concreto), ACI 234R-96, American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, 1996, 51 páginas.

Barger, Gregory S.; Lukkarila, Mark R.; Martin, David L.; Lane, Steven B.; Hansen, Eric R.; Ross, Matt W.; y Thompson, Jimmie L., "Evaluation of a Blended Cement and a Mineral Admixture Containing Calcined Clay Natural Pozzolan for High-Performance Concrete (Evaluación de los Cementos Adicionados y de los Aditivos Minerales que Contienen Puzolanas Naturales de Arcilla Calcinada para el Concreto de Alto Desempeño)," *Proceedings of the Sixth International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1997, 21 páginas.

Bhatty, M. S. Y., "Mechanism of Pozzolanic Reactions and Control of Alkali-Aggregate Expansion (Mecanismo de las Reacciones Puzolánicas y Control de la Expansión Alkali-Agregado)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Invierno 1985, páginas 69 a 77.

Bhatty, M. S. Y., y Greening, N. R., "Some Long Time Studies of Blended Cements with Emphasis on Alkali-Aggregate Reaction (Algunos Estudios a Largo Plazo de Cementos Adicionados con Énfasis en la Reacción Alkali-Agregado)," *7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, 1986.

Buck, Alan D., y Mather, Katharine, *Methods for Controlling Effects of Alkali-Silica Reaction* (Métodos para el Control de los Efectos de la Reacción Alkali-Sílice), Technical Report SL-87-6, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 1987.

Burg, R. G., y Ost, B. W., *Engineering Properties of Commercially Available High-Strength Concretes – Including Three-Year Data* (Propiedades de Ingeniería de los Concretos de Alta Resistencia Comercialmente Disponibles (Incluyendo tres años de datos), Research and Development Bulletin RD104, Portland Cement Association, 1994, 62 páginas.

Campbell, D. H.; Sturm, R. D.; y Kosmatka, S. H., "Detecting Carbonation (Detección de la Carbonatación)," *Concrete Technology Today*, PL911, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL911.pdf, Marzo 1991, páginas 1 a 5.

Carette, G. G., y Malhotra, V. M., "Mechanical Properties, Durability, and Drying Shrinkage of Portland Cement Concrete Incorporating Silica Fume (Propiedades Mecánicas, Durabilidad y Contracción por Secado del Concreto de Cemento Portland con Incorporación de Humo de Sílice)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Verano 1983.

Cohen, Menashi, D., y Bentur, Arnon, "Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solutions (Durabilidad de las Pastas de Cemento Portland con Humo de Sílice en Soluciones de Sulfato de Magnesio y Sulfato de Sodio)," *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Mayo-Junio 1988, páginas 148 a 157.

Detwiler, Rachel J., "Controlling the Strength Gain of Fly Ash Concrete at Low Temperature (Control del Desarrollo de la Resistencia del Concreto con Ceniza Volante a Baja Temperatura)," *Concrete Technology Today*, CT003, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/CT003.pdf, 2000, páginas 3 a 5.

Detwiler, Rachel J., *Documentation of Procedures for PCA's ASR Guide Specification* (Documentación de los Procedimientos para la Guía de especificación de la RAS de PCA), SN 2407, Portland Cement Association, 2002.

Detwiler, Rachel J.; Bhatty, Javed I.; y Bhattacharja, Sankar, *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements* (Materiales Cementantes Suplementarios para el Uso en Cementos Adicionados), Research and Development Bulletin RD112, Portland Cement Association, 1996, 108 páginas.

Farny, J. A., y Kosmatka, S. H., *Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactivity* (Diagnóstico y Control de la Reactividad Alkali-Agregado), IS413, Portland Cement Association, 1997, 24 páginas.

Gaynor, R. D., y Mullarky, J. I., "Survey: Use of Fly Ash in Ready-Mixed Concrete (Levantamiento: Uso de la Ceniza Volante en el Concreto Premezclado)," *NRMCA Technical Information Letter No. 426*, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, Junio 1985.

Gebler, S. H., y Klieger, P., *Effect of Fly Ash on the Air-Void Stability of Concrete* (Efecto de la Ceniza Volante sobre la Estabilidad de los Vacíos de Aire del Concreto), Research and Development Bulletin RD085, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD085.pdf, 1983, 40 páginas.

Gebler, Steven H., y Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete* (Efecto de la Ceniza Volante sobre Algunas Propiedades Físicas del Concreto), Research and Development Bulletin RD089, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD089.pdf, 1986, 48 páginas.

Gebler, Steven H., y Klieger, Paul, *Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete* (Efecto de la Ceniza Volante sobre la Durabilidad del Concreto con Aire Incluido), Research and Development Bulletin RD090, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD090.pdf, 1986a, 44 páginas.

Helmuth, Richard A., *Fly Ash in Cement and Concrete* (Ceniza Volante en el Cemento y en el Concreto), SP040T, Portland Cement Association, 1987, 203 páginas.

Hogan, F. J., y Meusel, J. W., "Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag (Evaluación de la Durabilidad y del Desarrollo de la Resistencia de la Escoria Granulada de Alto Horno Molida)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 3, No. 1, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Verano 1981, páginas 40 a 52.

Kerkhoff, Beatrix, *Effect of Substances on Concrete and Guide to Protective Treatments* (Efecto de las Sustancias sobre el Concreto y Guía de los Tratamientos de Protección), IS001, Portland Cement Association, 2001, 36 páginas.

Klieger, Paul, y Isberner, Albert W., *Laboratory Studies of Blended Cements—Portland Blast-Furnace Slag Cements* (Estudios de Laboratorio de Cementos Adicionados – Cementos Portland de Alto Horno), Research Department Bulletin RX218, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX218.pdf, 1967.

Klieger, Paul, y Perenchio, William F., *Laboratory Studies of Blended Cement: Portland-Pozzolan Cements* (Estudios de Laboratorio de Cementos Adicionados – Cementos Pozzolánicos), Research and Development Bulletin RD013, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD013.pdf, 1972.

Lange, David A., *Long-Term Strength Development of Concrete* (Desarrollo de la Resistencia del Concreto a Largo Plazo), RP326, Portland Cement Association, 1994.

Lerch, William, *Studies of Some Methods of Avoiding the Expansion and Pattern Cracking Associated with the Alkali-Aggregate Reaction* (Estudios sobre Algunos Métodos de Prevención de la Expansión y del Agrietamiento Asociado a la Reacción Alkali-Agregado), Research Department Bulletin RX031, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX031.pdf, 1950.

Malhotra, V. M., *Pozzolan and Cementitious Materials* (Materiales Pozzolánicos y Cementantes), Gordon and Breach Publishers, Amsterdam, 1996, 208 páginas.

PCA, *Survey of Mineral Admixtures and Blended Cements in Ready Mixed Concrete* (Levantamiento de los Aditivos Minerales y de los Cementos Adicionados en el Concreto Premezclado), Portland Cement Association, 2000, 16 páginas.

PCA Durability Subcommittee, *Guide Specification to Control Alkali-Silica Reactions* (Guía de la Especificación para el Control de las Reacciones Alkali-Sílice), IS415, Portland Cement Association, 1998, 8 páginas.

SFA, <http://www.silicafume.org>, Silica Fume Association, Fairfax, Virginia, 2000.

Stark, David, *Longtime Study of Concrete Durability in Sulfate Soils* (Estudio a Largo Plazo de la Durabilidad del Concreto en Suelos con Sulfatos), Research and Development Bulletin RD086, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD086.pdf, 1982.

Stark, David, *Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils* (Durabilidad del Concreto en Suelos Ricos en Sulfatos), Research and Development Bulletin RD097, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD097.pdf, 1989, 14 páginas.

Tikalsky, P. J., y Carrasquillo, R. L., *Effect of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete Containing Fly Ash* (Efecto de la Ceniza Volante sobre la Resistencia a los Sulfatos de los Concretos Conteniendo Ceniza Volante), Research Report 481-1, Center for Transportation Research, Austin, Texas, 1988, 92 páginas.

Tikalsky, P. J., y Carrasquillo, R. L., *The Effect of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete* (El Efecto de la Ceniza Volante sobre la Resistencia a los Sulfatos del Concreto), Research Report 481-5, Center for Transportation Research, Austin, Texas, 1989, 317 páginas.

Whiting, D., *Strength and Durability of Residential Concretes Containing Fly Ash* (Resistencia y Durabilidad de los Concretos Residenciales Conteniendo Ceniza Volante), Research and Development Bulletin RD099, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD099.pdf, 1989, 42 páginas.