

Cenizas, cementos y hormigones con cenizas(*)

Prof. Dr. JOSE CALLEJA IETCC/CSIC - MADRID - España

RESUMEN

En este trabajo se exponen la composición química y la naturaleza morfológica de las cenizas pulverulentas de los carbones, así como sus características físicas. Se describen asimismo sus influencias —acciones y efectos— sobre las principales propiedades y comportamientos más importantes de los cementos y de los hormigones, así como las condiciones más idóneas para su más eficaz empleo con y en ellos.

SUMMARY

This paper describes the chemical composition and the morphological nature of pulverized coal ashes, as well as their physical characteristics. Their influences —actions and effects— on the main properties and behaviour of cements and concretes, and the more adequate conditions for their efficient use un them are also described.

0. GENERALIDADES

Por cenizas volantes —en inglés fly-ash (FA)— o cenizas pulverulentas de combustibles —en inglés, pulverized-fuel-ash (PFA)—, se entienden las procedentes de la combustión en centrales termoeléctricas de combustibles generalmente sólidos y, en particular, de carbones antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos y lignitos, por orden de mayor a menor potencia calorífica y de menor a mayor contenido de volátiles; preferentemente de los bituminosos, como carbones antiguos, que son los que mayor cantidad de residuos sólidos dejan.

En lo sucesivo se las denominará simplemente cenizas, para abreviar.

En la combustión de los carbones citados se suele producir de un 15 a un 30 % de escoria, siendo el resto ceniza que escapa con los gases de combustión y que es captada en electrofiltros o por sistemas mecánicos —ciclones—.

La recogida de cenizas por precipitación en electrofiltros se basa en la poca conductividad de las partículas, a la cual ayuda la capa de ácido sulfúrico adsorbida sobre las mismas. Este proviene de la oxidación-combustión del azufre de los sulfuros (FS_2), a SO_2 primero y a SO_3 después, el cual reacciona con vapor de agua por debajo de $350^\circ C$ para formar H_2SO_4 , que a $120-130^\circ C$ —temperatura de rocío del ácido sulfúrico— se condensa sobre la superficie de las partículas en suspensión, las cuales se encuentran en la chimenea a una temperatura menor que la de los gases. La suspensión acuosa de las partículas en un principio tiene un pH de 4 a 5. En todo caso, en la superficie de las partículas exis-

* Texto entregado con motivo de conferencias pronunciadas por el autor, sobre "Utilización de Cementos con Adiciones en Pavimentos de Hormigón", en la Reunión Anual de 1982 de la Asociación Brasileña de Pavimentación, en Brasilia, y sobre "Cementos con adiciones para Hormigón de Cimentaciones y Obras Subterráneas", en la Reunión Conmemorativa del 10.º Aniversario del IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) y en la 33.ª Reunión de Técnicos de la Industria del cemento, de la ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland, en Sao Paulo (Brasil), del 22 al 28 de Julio de 1982.

ten iones SO_4^{2-} adsorbidos, los cuales proporcionan cargas electrostáticas que facilitan la precipitación de aquéllas.

Las cenizas, como subproducto, se han venido utilizando por varios motivos: conservación y reciclado de recursos y materias primas, conservación y ahorro de energía, protección ambiental y, en el campo del hormigón, por imperativos del desarrollo tecnológico moderno de este material.

Las cenizas son aptas como adiciones activas al clinker de cemento portland, en paralelo con las puzolanas naturales, ya que como materiales activos, confieren a los cementos resultantes propiedades y comportamientos específicos distintos y mejores en muchos aspectos que los de los cementos portland ordinarios que no contienen adiciones activas o constituyentes secundarios.

Las cenizas se han utilizado también como elementos sustitutivos o complementarios de las fracciones finas de los áridos, cuando éstos son deficitarios en ellas.

Finalmente se han empleado asimismo como aditivo —en el recto sentido de este concepto— para hormigón, o como material cementante complementario o sustitutivo del cemento.

Por supuesto que, en general, una ceniza adecuada puede ejercer y ejerce simultáneamente las tres funciones, a veces de forma inseparable, hasta el punto de que acaso se ha utilizado como sustitutivo de cemento y arena a un tiempo.

Como sustitutivo del cemento en peso en distintas proporciones (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40... %) y como sustitutivo (o complemento de finos) de la arena, en proporción de 40 a 60 % en volumen; y a veces de forma combinada tal, que la relación ceniza total/cemento resulta ser también de 40 a 60 % (en peso).

Estos pudieran ser los principales motivos generales de empleo de las cenizas volantes, desde puntos de vista técnicos, aunque también los hay de carácter económico: ahorro de clinker en el cemento —y, por consiguiente, de energía -combustibles, electricidad- y materias primas en la fabricación del cemento—, cuando se utilizan molidas y/o mezcladas con el clinker en fábrica; y ahorro de cemento en el hormigón —y, por lo tanto, reducción del costo de éste—, cuando se añaden directamente en las hormigoneras de las centrales o de las obras. Ello se debió al menor precio de la ceniza, detalle que ya se aprovechó en los años 50.

Los motivos técnicos y los económicos suelen ir indisolublemente unidos entre sí, y también a los positivos fines ecológicos de la conservación del medio ambiente, al suprimir las acumulaciones de cenizas como subproductos de desecho, salvo mejor fin.

1. COMPOSICION DE LAS CENIZAS

La composición química de las cenizas es bastante variable, pero similar a la de los grupos de minerales de la arcilla. Podría establecerse entre los límites, muy amplios, con valores medios más acotados, señalados en el Cuadro 1.

Los valores de los diferentes conceptos analíticos se corresponden numéricamente en cada ceniza. Es de advertir que la número 4 se desvía un tanto de las restantes, como indican los valores de S, A, F, C y M. Asimismo destaca el hecho del buen ajuste a 100 % de la suma de los valores medios, así como del centro del intervalo entre sumas de máximos y mínimos.

CUADRO 1
VALORES %

	Conceptos analíticos	Máximos	Mínimos	Medios	Máx. máx.	Mín. mín.	Med. med.	Med. interv.
1	S	58	45	52	65	28	51	46,5
2		61	44	53				
3		62	45	54				
4		* 42	28	36				
5		65	50	58				
6		52	45	49				
7		53	47	50				
8		57	49	54				
Medias		56	44	51				
1	A	27	20	23	39	8	26	23,5
2		36	13	28				
3		36	13	27				
4		* 21	8	16				
5		39	14	30				
6		28	25	27				
7		26	24	25				
8		33	29	31				
Medias		31	16	26				
1	F	10	8	9	32	0,5	7	16,25
2		6	2	4				
3		6	1	4				
4		* 32	6	14				
5		4	0,5	2				
6		14	9	11				
7		7	5	6				
8		5,5	2,5	4				
Medias		10,5	4,25	7				
1	— F	—	—	—	5,5	0,5	2	3
2		3	0,5	1,5				
3		3	0,5	2				
4		5,5	0,5	2				
5		4	0,5	2				
6		—	—	—				
7		—	—	—				
8		—	—	—				
Medias		4	0,5	2				
1	C	10,5	3	7,5	29	0,5	6	14,75
2		14	1	5				
3		13,5	1	4				
4		* 29	6	19,5				
5		9	0,5	2				
6		4	1	2				
7		7,5	6	7				
8		2	1,5	1,75				
Medias		11	2,5	6				
1	M	2,5	1	2	6,5	0,5	1,5	3,5
2		2	0,5	1,5				
3		2	0,5	1				
4		* 6,5	1	3,5				
5		2	0,5	1				
6		1	1	1				
7		2	1	1,5				
8		1,5	0,75	1				
Medias		2,5	0,75	1,5				

CUADRO 1 (continuación)

VALORES %

	Conceptos analíticos	Máximos	Mínimos	Medios	Máx. máx.	Mín. mín.	Med. med.	Med. interv.
1	K	2,5	1	1,5	3	0,25	1,25	1,625
2		3	0,5	1,5				
3		2,5	0,5	1,5				
4		0,75	0,25	0,5				
5		3	0,5	1,5				
6	—	—	—	—				
7		—	—	—				
8		1	0,5	0,75				
Medias		2	0,5	1,25				
1	N	1	0,5	0,75	1,5	0	0,5	0,1
2		1,5	0	0,75				
3		1,5	0	0,5				
4		1	0	0,25				
5		1,5	0,25	0,5				
6		—	—	—				
7		—	—	—				
8		0,5	0	0,25				
Medias		1	0,1	0,5				
1	\bar{S}	2	0,5	1,5	2	0	0,75	1
2		1,5	0	0,75				
3		1,5	0	0,5				
4		2	0	0,75				
5		0,5	0	0,25				
6		1,5	0,5	1				
7		1	0,5	0,75				
8		0,5	0	0,25				
Medias		1,5	0,2	0,75				
1	PF	7,5	0,5	2,5	10,5	0,5	3,5	5,5
2		—	—	—				
3		—	—	—				
4		5	1,5	3				
5		—	—	—				
6		—	—	—				
7		—	—	—				
8		7,5	4	6				
1	Carbono	6,5	0,5	2				
2		10	0,5	3				
3		10,5	0,5	4				
4		—	—	—				
5		—	—	—				
6		—	—	—				
7		—	—	—				
8		—	—	—				
		7,75	1,25	3,5				
Medias		127,25	70,05	99,5	194,0	38,75	99,5	116
Centro intervalo		98,7						

El Cuadro 2 muestra los valores máximos, mínimos y medios de los, a su vez, máximos, mínimos y medios de composición química, correspondientes a unas 150 cenizas de 8 países de los tres principales continentes. Se puede observar también el buen ajuste a 100 % de la suma de las medias de medias, de las sumas de los mínimos maximorum y de los máximos minimorum —muy concordantes entre sí—, y también del centro del intervalo entre sumas de máximos y mínimos de las medias.

CUADRO 2
VALORES %

Conceptos analíticos	Máx. máx.	Mín. máx.	Med. máx.	Máx. mín.	Mín. mín.	Med. mín.	Máx. med.	Mín. med.	Med. med.
S	63,3	50,7	56,1	47,9	29,9	39,1	58,0	41,1	49,4
A	37,2	28,3	32,2	23,9	10,8	19,2	27,2	20,8	25,5
F	31,3	5,9	15,7	8,5	1,5	5,3	17,5	4,3	9,6
C	38,8	5,8	13,0	11,1	0,8	2,8	6,0	2,8	4,4
M	4,5	1,2	2,6	1,9	0,0	0,8	2,4	0,6	1,6
\bar{S}	7,0	0,8	3,3	0,6	0,0	0,2	1,6	0,3	0,9
N	2,4	0,6	1,5	0,9	0,1	0,3	1,5	0,3	0,8
K	6,0	2,9	3,7	1,8	0,6	1,1	3,9	1,3	2,4
PF	23,5	1,2	14,0	1,5	0,05	0,8	9,7	0,7	5,5
	214,0	97,4	142,1	98,1	33,75	69,6	127,8	72,2	100,1
Centros intervalo	100								

El Cuadro 3 presenta otros valores aislados e intervalos de composición correspondientes a cenizas de carbones bituminosos de procedencias análogas.

Los carbones antracíticos y bituminosos dan cenizas ricas en S + A + F, con contenidos totales de estos componentes superiores a 70 %, mientras que los carbones sub-bituminosos y ligníticos dan cenizas más pobres en dichos componentes ($S + A + F < 70 \%$) —sobre todo en A—, y más ricos en cal, magnesia y sulfatos ($C + M + S > 30 \%$).

CUADRO 3
VALORES %

Conceptos analíticos	Valores aislados				Intervalos				Medias redondeadas a 0,5
S	49	50	51	52	48 -51	48 -51	48 -52	49 -50	50,5
A	27	24	26,5	26	20 -27,5	20 -22	20 -27,5	26,5-27,5	24,5
F	10,5	11	9,5	9	9,5-12	9,5-12	9 -12	10 -10,5	10,5
C	2	4	1,5	1,5	4 -11	6,5-11	1,5- 6,5	4 - 5	5,0
M	1,5	2	1,5	1,5	1,5- 3	2,5- 3	1,5- 3	1,5- 2	2,0
K	—	—	3,5	} 2	—	—	—	—	1,5
N	—	—	0,75		—	—	—	—	
\bar{S}	1	2	0,5	0,75	0,5-3,5	1,5- 3,5	0,5- 3,5	0,5- 1,5	1,5
PF	3,5	2	—	1,5	—	—	1,5- 3,5	—	2,5

Finalmente, el Cuadro 4 muestra las composiciones de cenizas un tanto atípicas.

CUADRO 4
VALORES %

	Máx.	Mín.	Med.	
S	24,0	4,0	15,5	34,5
A	12,5	2,0	8,0	17
F	73,0	37,0	55,0	6
\overline{F}	19,0	6,5	13,5	
C	11,0	0,5	3,5	30,5
M	3,0	0,5	1,5	4,5
K	1,0	0,0	0,5	
N	1,0	0,0	0,5	1,5
\overline{S}	1,0	0,0	0,5	3,5
PF	—	—	—	0,5
			98,5	98,0

Por supuesto que en las propiedades, comportamiento y utilización de las cenizas con fines puzolánicos influye su composición, y en particular la proporción de sus componentes mayoritarios, S, A y F y su suma. Las propiedades de los cementos que las contienen también dependen de la composición de las cenizas. Esta suele ser estable para las de una misma fábrica, resultantes de carbones análogos, pero no en cuanto a su contenido de carbono —que depende de las condiciones de la combustión—, ni en lo referente a su actividad puzolánica basada en la fijación de cal.

Es importante la naturaleza del combustible de que proceden las cenizas, pues ella determina en cierta medida la composición química y las características físicas de las muestras. Y así, por ejemplo, al menos en determinados países no se utilizan o, en general se utilizan muy poco, las cenizas procedentes de lignitos.

La composición química de las cenizas ha sido y es objeto de limitaciones. Entre éstas, y para cenizas utilizables en hormigón, se han señalado las siguientes:

PF	6,5-7 %
H	0,5 %
M	4 %
\overline{S}	2,5 %

El valor de la pérdida al fuego se relaciona casi siempre directamente con el contenido de carbón —coque— en las cenizas, hasta el punto de que sirve como criterio para determinar el contenido de carbón indeseable en las mismas por su carácter inerte y débil, y por afectar a la función de los aditivos inclusores de aire.

En otro caso se considera que cenizas con contenidos de carbón superiores al 10 % y con valores de pérdida al fuego superiores a 11-12 % no son aptas para hormigones aireados resistentes a las heladas, por la influencia desfavorable del contenido de carbono en las dosificaciones, efectos y control de los agentes inclusores de aire en el hormigón, como se indica en otro lugar.

No obstante, se ha llegado a considerar que la mayor demanda de agua de una ceniza por razón de su contenido de carbón puede ser beneficiosa en cierto modo, desde el punto de vista de un "curado interno", al retener un agua para la hidratación a fondo de los productos que se van formando con el tiempo por efecto de una acción puzolánica diferida.

2. CONSTITUCION DE LAS CENIZAS

Los óxidos ácidos y básicos que componen las cenizas se encuentran formando parte de constituyentes análogos a los minerales arcillosos, de tal manera que del 50 al 80 % del total de las mismas son silico-aluminatos, en tanto mayor proporción cuanto mayor es la edad de los carbones de procedencia —mayor, por tanto, en los bituminosos y sub-bituminosos, como más viejos—.

La formación de los silico-aluminatos tiene lugar primeramente por fusión, en la cual se produce la esfericidad de las partículas, debida a la tensión superficial del magma fundido. Después y durante el enfriamiento puede tener lugar una recristalización parcial de constituyentes.

Las esferas —cenosferas— formadas principalmente por fase vítrea fundida, incluyen entre los constituyentes: i) alumino-silicatos, mayoritariamente como mullita; ii) cuarzo, incluido como partículas discretas aisladas en un esqueleto-soporte de mullita, o disuelto en el vidrio; iii) magnetita, también en forma de partículas aisladas, o como constituyente de la fase vítrea; iv) coque, en forma de partículas grandes y porosas, con partículas muy pequeñas de silicatos, menores de 1 μm ; y v) sulfatos alcalinos y alcalinotérreos, en proporciones decrecientes, según el siguiente orden de cationes: C, N, K y M; todos ellos solubles, siendo los de magnesio muy escasos en general.

Los silico-aluminatos tienen carácter ácido y contribuyen al carácter puzolánico de las cenizas frente a la cal o frente al cemento portland. La mullita y el cuarzo en ella engastado forman la masa principal de las partículas de escoria.

El cuarzo —y también el sulfato de calcio en partículas aisladas— se suelen encontrar en cenizas de ciertos carbones sub-bituminosos y de minería explotada a cielo abierto, las cuales no suelen ser válidas para mezclar con el cemento, o para sustituir éste por ellas.

Las magnetitas y el coque han de considerarse como inertes a efectos puzolánicos. El aumento de carbón —coque— y/o la pérdida al fuego de las cenizas se debe a veces a una baja temperatura de combustión y con atmósfera reductora del carbón, con objeto de evitar la formación excesiva de óxidos de nitrógeno contaminantes atmosféricos, de acuerdo con las reglamentaciones. Por otra parte, las partículas grandes y porosas de coque absorben agua y dan lugar a aumentos de porosidad en la pasta conglomerante, por lo cual su contenido en las cenizas se suele limitar a un máximo admisible del 10 %.

Por otro lado, las pequeñas partículas de silicatos incluidas en el coque reaccionan con la cal de hidrólisis del cemento por efecto puzolánico, reforzando con ello las partículas de coque en la pasta, lo cual es bueno para el hormigón.

Los sulfatos alcalinos y alcalinotérreos, en general rápidamente solubles, se encuentran adsorbidos en la parte superficial de las cenosferas, pues se acumulan allí por condensación posterior a la formación de éstas y, por lo tanto, no penetran en el interior de su masa vítrea. La condensación en la superficie depende de la temperatura y del tiempo, y del tamaño de las partículas para que tenga lugar la interacción gas-sólido.

En la actualidad, el contenido de sulfato de las cenizas es en general menor, dada la mayor finura de los carbones que se queman y los sistemas de combustión que se utilizan, y dado el menor contenido de cloro de aquéllos, el cual es causa de que se reduzca la cantidad de álcalis volátiles en la llama. Por otra parte, a mayor tiempo de permanencia de las cenizas en la llama, mayor cantidad de álcalis captados en y por los silicatos, y menor resto de álcalis disponibles para formar sulfatos con el SO_3 de los gases de combustión.

Límites característicos para los constituyentes de las cenizas suelen ser los señalados en el Cuadro 5.

CUADRO 5
VALORES %

Conceptos analíticos	Intervalos	Medias
Alumino-silicatos	60-85	70
Mullita	10-20	15
Vidrio	60-80	70
Cuarzo	1-10	7
Magnetita (Hematites...) Fe_2O_3	3-25	4
Sulfatos (C, K, N)	1-6	3

Como es lógico, la naturaleza y proporción de los constituyentes de las cenizas influyen en sus características con vistas a su aprovechamiento, especialmente como puzolanas.

3. NATURALEZA VITREO-CRISTALINA DE LAS CENIZAS

Se ha indicado que los sílico-aluminatos de las cenizas se forman por fusión, de la cual puede resultar en el enfriamiento —y según las condiciones de éste— una fase vítrea y unos constituyentes cristalinos en proporciones recíprocas variables.

Esto es importante porque la relación vidrio/cristal es decisiva para el poder puzolánico de las cenizas, hasta el punto de que se considera que dicha relación debe ser, aproximadamente, 70/30.

No sólo la cantidad de vidrio, sino la naturaleza y estructura de éste en las cenizas, condicionan en gran medida el comportamiento de las mismas. A tal efecto se puede considerar que existen cuatro tipos fundamentales de granos o partículas en una ceniza, a saber:

- i) granos redondos o esferoidales vítreos y compactos de superficie más bien lisa, ricos en C;
- ii) granos esféricos vítreos y asimismo compactos, de superficie con apariencia más bien rugosa ricos en F y constituidos mayormente por magnetita y hematites.
- iii) granos porosos, que pueden ser vítreos y ricos en S y A —con mullita y cuarzo—, o ricos en carbón,
- iv) y partículas irregulares, escasas en número, consistentes en cuarzo aislado y/o fragmentos vítreos.

Las esferas vítreas ricas en cal son las más rápidamente reactivas —por ejemplo frente a disoluciones de molibdato—, seguidas de las ricas en F y de los vidrios ricos en S y A, de tal manera que la puzolanicidad de las cenizas depende de su proporción conjunta de los dos primeros tipos de granos, y menos de la proporción de los del tercer tipo.

4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CENIZAS

Dentro de las características físicas de las cenizas, las más importantes son, tal vez, las relacionadas con su finura: superficie específica, residuos sobre tamices y, sobre todo, granulometría.

Parece ser que la finura de una ceniza, en relación con sus propiedades y comportamiento, queda mejor definida por el valor de su residuo en un tamiz, que por su superficie específica, pues siendo ambos valores numéricos únicos, el de la segunda — cm^2/g BLAINE— es mucho menos reproducible (o no lo es en absoluto), ya que se ve muy afectado por el contenido de partículas de carbón poroso en las cenizas, el cual perturba por su capacidad de adsorción. Por ello se recurre, en la caracterización de las cenizas por su finura, al residuo sobre el tamiz de $45\ \mu\text{m}$, efectuando el tamizado, bien en seco, o bien en húmedo, o por lavado con acetona que es más rápido.

Cada ceniza de cada origen tiene sus propias características, y a veces un residuo bajo en tamiz de $45\ \mu\text{m}$ corresponde a una superficie específica baja, ya que en ésta influye la densidad de la ceniza y el error (humano) inherente a su determinación. El residuo sobre tamiz de $45\ \mu\text{m}$ garantiza, pues, una mayor reproducibilidad, sin perjuicio de que permite acusar la variabilidad de las cenizas de una misma procedencia.

La acción positiva de una ceniza, en cuanto a resistencia de morteros, se ha visto ser inversamente proporcional a su residuo sobre el tamiz de $45\ \mu\text{m}$.

En todo caso, la mayor influencia de las cenizas en su comportamiento con los cementos y en los hormigones es atribuida, en general, a la finura.

Los criterios limitativos del residuo sobre tamiz de $45\ \mu\text{m}$ son variables, señalando algunos, un residuo menor de 12,5 %, y otros aceptando valores entre 20 y 50 %.

En cuanto a la densidad, las cenizas menos densas son las de mayor proporción de partículas a veces huecas, las cuales contienen carbono, casi todo él amorfo, y a su vez con superficie específica y capacidad de adsorción variables.

Esto no sólo influye en los valores irreproducibles hallados en la determinación de la superficie específica BLAINE —o en otras basadas en adsorción de gases—, sino que influye asimismo y mucho en la adsorción —y rendimiento y comportamiento— de los aditivos fluidificantes y superplastificantes del hormigón (en dependencia también de éstos), provocando variaciones incontrolables e incontroladas, tanto en el contenido de aire ocluido por el hormigón, como en la reología, fluidez y trabajabilidad del mismo.

Otro parámetro ligado a la densidad —aparente, en este caso— de las cenizas es su “peso del litro”, cuyo valor está relacionado, a través de la forma y tamaño de las partículas, y de la proporción de cenosferas, con la fluidez que las cenizas son capaces de conferir a los hormigones. En efecto, la fluidez es mayor cuanto mayor es el peso del litro: mayor número de partículas más pequeñas y con mayor poder dispersante; y también cuanto mayor es el contenido de partículas esféricas, sobre todo para relaciones agua/conglomerante bajas.

No parece haber tampoco relación entre la superficie específica y la granulometría, pues la primera varía también mucho con la forma de las partículas y con la existencia en ellas de alvéolos —porosidad abierta—.

La finura de las cenizas, en cualquiera de sus manifestaciones y expresiones, tiene mucho que ver, a igualdad de lo demás, con la puzolanidad, con la exigencia y retención de agua y con todas las propiedades y comportamientos del hormigón derivados de ello, particularmente con las resistencias.

Por eso, y habida cuenta de que la ceniza reacciona con la cal de hidrólisis del cemento, CH, en la superficie, para activarla se incrementa ésta por molienda, con lo que se consiguen aumentos de resistencia en hormigón, aunque no espectaculares. Si se refinan demasiado las cenizas, los aumentos de resistencia llegan a ser nulos, e incluso negativos, aparte del factor desfavorable del costo del refinado excesivo.

Las diferencias de composición y naturaleza de las partículas correspondientes a tamaños —fracciones granulométricas— distintos, llegan a ser grandes. Así se observa a veces que en las fracciones intermedias de 60-80 μm se acumula S (aproximadamente 56 %) con menor proporción de A (aproximadamente 31 %), y con relación S/A aproximada de 1,8; mientras que en las fracciones extremas de 200 μm y 40 μm se acumula más A (aproximadamente 37 %) y menos S (aproximadamente 48,5 %), con relación S/A aproximada de 1,3, con los consiguientes valores intermedios por ambos lados. Esto explica los diferentes comportamientos de las distintas fracciones, incluso en el aspecto puzolánico.

A tales efectos los tamaños más representativos son los menores de 80 μm , ya que en los más gruesos se acumulan los inquemados que perturban en todos los órdenes. Por esta razón se ha intentado alguna vez mejorar el comportamiento de las cenizas corrigiendo su granulometría natural por supresión de alguna fracción gruesa.

En cuanto a la modificación de la granulometría de las cenizas, por ella se puede conseguir que dos cenizas diferentes, con distinta actividad puzolánica puedan llegar a tenerla muy semejante, lo cual denota hasta qué punto es importante el factor granulométrico.

5. LAS CENIZAS EN LA HIDRATACION DE CEMENTO

Tres son los factores que se pueden considerar como fundamentales en cuanto a la influencia de las cenizas en la hidratación de los cementos:

- i) su contenido de SO_4^{2-} ($\text{SO}_3 = \bar{\text{S}}$);
- ii) la reacción puzolánica entre las partículas de ceniza y los iones OH^- de la pasta cementicia;
- iii) la cantidad de álcalis (N, K) liberados por la ceniza, y la velocidad con que se liberan.

En cuanto a i), ya se indicó que los sulfatos solubles se encontraban en la superficie de las partículas. Al tratarse de sulfatos alcalinos y alcalinotérreos —de calcio— solubles, existe una relación entre los contenidos de los correspondientes metales en la disolución o extracción acuosa de la ceniza y el S soluble; y, por lo tanto, entre el valor de éste hallado experimentalmente y el calculado a partir de dichos metales en solución, dado que apenas existen otros aniones en ella.

Hasta tal punto es esto así, que existen métodos basados en la comparación de la conductividad electrolítica de las disoluciones, con la de otra tomada como patrón, para determinar la concentración de sulfatos y, por lo tanto, el contenido de sulfatos solubles en las cenizas. La cantidad de éstos es menor que la de sulfatos totales procedentes de la oxidación completa del azufre del carbón.

El contenido de sulfatos de las cenizas es, en general, menor que el del clínker, y ambos pasan a disolución antes del fraguado, con lo cual no crean problemas de expansión a largo plazo.

Los sulfatos influyen favorablemente, como es bien sabido, en las resistencias de los cementos a plazos muy cortos, aunque con detrimento, a veces, de sus resistencias a más largos plazos. Por ejemplo, con cenizas lavadas desprovistas de sulfatos solubles se obtienen menores resistencias a corto plazo que con las mismas cenizas sin lavar, pero con éstas la resistencia a menos de 14 días puede resultar menor en un 40 %.

En cuanto a ii) y iii), parece existir una relación experimental entre la velocidad de paso a la disolución y la cantidad de N y K traspasada a ésta desde la ceniza tratada con cal, por una parte, y la velocidad de reacción de las partículas de ceniza con liberación iónica de silicatos y aluminatos, por otra. Ello podría suponer un procedimiento de determinar la puzolanidad de una ceniza.

Tanto la velocidad de paso como la cantidad de álcalis que pasan a disolución aumenta con la temperatura, pero es muy difícil que pueda tener lugar la reacción puzolánica completa de la ceniza, por cuanto que la difusión de iones OH^- a través de los productos de reacción formados alrededor de las partículas es muy lenta. Lo mismo sucede en el caso de las escorias siderúrgicas, y ello es importante en cuanto a la reacción árido-álcalis.

Las cenizas dan disoluciones acuosas de $\text{pH} > 7$, por formación hidrolítica de CH y (N, K)H. En un principio el pH es menor que 7 (ácido), por la disolución del ácido sulfúrico adsorbido en la superficie de las partículas. Las disoluciones son tanto más básicas cuanto menor es el contenido de S de las cenizas, esto es, cuanto menor es el contenido de azufre en el carbón.

Amasadas las cenizas con poca agua, si se da en la pasta un $\text{pH} > 11$ se forma yeso, ettringita e hidrosilicatos que cristalizan y/o forman geles, es decir, las cenizas experimentan un autofraguado —propiedad hidráulica “per se”, como la latente de las escorias siderúrgicas—. A $\text{pH} < 10$ esto no sucede. Se ve, pues, que se precisa un cierto pH y tal vez también una cierta concentración de cal en la fase líquida.

El pH de las dispersiones acuosas de cenizas, aunque variable de unas a otras, suele oscilar entre un máximo de 11 y un mínimo de 9,5, con un valor medio de 10 a 10,5. La variación (disminución) del pH de las pastas por consumición de OH^- en la fase líquida —reducción de la reserva alcalina— es importante a efectos de la corrosión de las armaduras.

Las cenizas contribuyen a acelerar la hidratación de los constituyentes del clínker y dan a la pasta una estructura evolutiva especial. En primer lugar, alrededor de las cenosferas se forma un espacio ocupado por la fase líquida, el cual se va rellenando con la cal que se forma en la hidrólisis de los silicatos y con los productos hidratados de la combinación de esta cal con los sulfatos y con los silicoaluminatos de la ceniza. Las propiedades de la pasta dependen en buena parte de la naturaleza y de la evolución de la adherencia de los productos formados en la interfase esfera/matriz de la pasta, todo lo cual depende de las características del clínker y de la ceniza, así como de la finura y proporciones de ambos, y del tiempo.

En efecto, a cortas edades esta interfase presenta una mayor proporción de superficie in-consolidada, tanto mayor cuanto mayor es la proporción de ceniza. Esta es la razón por la cual la disminución de resistencia causada por las cenizas es tanto mayor cuanto mayor es su proporción y más corta es la edad. Pero este efecto se atenúa con la consolidación de la interfase, es decir, con el tiempo, llegando incluso a producir los conocidos aumentos de resistencia a largo plazo.

Este efecto es general para cualquier tipo de adición, incluso si, como en el caso de las cenizas —o de las escorias siderúrgicas—, el grado de hidratación a una cierta edad llega a ser mayor que el del cemento portland sólo. Esto se aprecia a través de la relación resistencia mecánica específica/tiempo, es decir, la resistencia por unidad de clínker hidratado, a lo largo del tiempo: hasta 14-28 días —plazos variables según casos y circunstancias—, es menor la del cemento con ceniza que la del portland sólo; pero después, cuando las cenosferas se han soldado con la pasta y las huecas se han rellenado de productos de hidratación, llega a ser mucho mayor la del cemento con ceniza.

Así pues, la reducción de agua y de la relación a/c por las cenosferas es a costa de una menor resistencia específica inicial, a causa de los espacios líquidos entre las partículas y la matriz de la pasta.

Es sabido que el retraso en la hidratación del C_3A por \overline{CS} se debe a la formación topoquímica de una membrana semipermeable de ettringita sobre las partículas y granos, y que en exceso de yeso la ettringita se forma a través de la fase líquida y cristaliza por doquier.

En el caso de cementos con cenizas existe un exceso inicial de iones sulfato en la disolución, por lo señalado anteriormente, los cuales se adsorben rápidamente sobre la superficie del C_3A , evitando la hidrólisis de éste, y el paso de cal a la disolución y el consiguiente aumento de alcalinidad en ésta.

Después de la fase de formación de ettringita se forman aluminatos hidratados hexagonales, por difusión de agua, no obstante retardada. Finalmente el aluminato hidratado hexagonal se transforma en cúbico y el resto del C_3A anhidro se hidrata rápidamente.

Pues bien, parece ser que la ceniza estabiliza la fase hexagonal, tanto en el caso de un C_3A de laboratorio como en el de un clínker, si bien los hidratos hexagonales formados en cada caso son distintos. Los del clínker, por provenir de un C_3A no puro, no son estequiométricos sino que contienen inclusiones —entre ellas de S—, las cuales provocan un desorden en la red cristalina que inhibe la transformación de la fase hexagonal a la cúbica.

En resumen, la acción de las cenizas en la hidratación de los aluminatos se podría esquematizar así: primero tiene lugar una adsorción de iones SO_4^{2-} de la fase líquida sobre el C_3A , la cual reduce la superficie de éste para la disolución; después se forma ettringita que consume agua sustrayéndola del sistema; a continuación tiene lugar la migración de iones SO_4^{2-} a través de la membrana semipermeable y la formación y la estabilización de la fase hexagonal hidratada; y finalmente se produce el paso de la fase hexagonal hidratada a la cúbica, si bien de forma mucho más retardada que en ausencia de ceniza.

La formación de ettringita por reacción de la alúmina de las cenizas con cal y con yeso —sulfatos—, contribuye al incremento de las resistencias a plazos cortos, de forma semejante a como la formación de mayores cantidades de geles tobermoríticos C_xS_xH , da por resultado un aumento de las resistencias a plazos más largos.

6. LAS CENIZAS Y EL CALOR DE HIDRATACION

Una de las primeras razones de ser —si no la primera— del empleo de las cenizas volantes en el hormigón (al menos en 1930 y 1940 y durante y después de la Segunda Guerra Mundial en USA), fue el de la reducción del calor de hidratación del hormigón en masa.

La reducción del calor de hidratación de los hormigones por adición de ceniza se debe, en primer lugar, a un efecto de dilución del clinker —o del cemento—, puesto que el calor de hidratación (o de acción puzolánica) de las cenizas es menor que el del clinker o cemento, y además desprendido con mayor lentitud. Por ello la reducción del calor de hidratación es proporcional a la cantidad de ceniza. También lo es la mayor lentitud en el desprendimiento del mismo, ya que al aumentar la proporción de ceniza aumenta el tiempo de fraguado (endurecimiento), es decir, disminuye la velocidad global de hidratación.

Pero también la naturaleza de la propia ceniza influye, en el sentido de que las más ácidas —ricas en S, A y F— reducen menos el calor de hidratación que las más básicas —ricas en C, M y S—, dependiendo de los carbones de que unas y otras proceden (antracitas y bituminosos las primeras y lignitos y sub-bituminosos las segundas).

La disminución del efecto térmico de las cenizas es función de su proporción en los elementos de hormigón de espesores hasta 5 m y más, dependiendo su cuantía del aumento de temperatura por cada 100 kg de cemento.

Por otra parte, es sabido que los aumentos de temperatura aceleran la resistencia de los hormigones de cemento portland ordinario, si bien a costa de reducir las resistencias a largo plazo. Pues bien, con los cementos y hormigones con cenizas sucede todo lo contrario, por efecto puzolánico, con la ventaja de que la elevación de temperatura no es tan grande en elementos de gran espesor y en hormigón muy masivo. Se han fabricado pilares pretensados calentando indirectamente el hormigón a 35°C.

Por todo ello, los cementos y hormigones con cenizas son especialmente aptos para presas y firmes de carreteras, así como por otras ventajas adicionales señaladas en otro lugar. También lo son cuando se especifican hormigones de alta resistencia, con buena trabajabilidad para su puesta en obra y con gradientes de temperatura mínimos, como sucede en las centrales de fuerza (termoeléctricas y termonucleares).

Podría parecer, deduciéndolo del menor calor de hidratación de los cementos y hormigones con cenizas, que éstos han de comportarse peor que los de cemento portland sin cenizas en el hormigonado en tiempo frío. Aun admitiendo que así sea en general, se ha señalado que, si se puede garantizar una resistencia a 28 días igual o superior a 35 N/mm², con un buen curado y protección del hormigón, el de cemento y ceniza no es distinto del de cemento sólo, en el hormigonado en tiempo o climas fríos.

7. LAS CENIZAS Y LA PUZOLANICIDAD

Una de las principales razones de ser del empleo de las cenizas es su acción puzolánica. Esta depende del tipo de ceniza, considerándose en general como mejores, a tales efectos, las de carbones antracíticos y bituminosos, más ricas en componentes ácidos, y peores las de carbones sub-bituminosos y ligníticos, más ricas en componentes básicos y sulfatos.

La actividad puzolánica de las cenizas depende también de su estructura vítrea, la cual está condicionada a su vez por la propia composición química y por la historia térmica de

su formación. La cal de hidrólisis del cemento reacciona con el vidrio de la ceniza, con velocidad dependiente de la finura de la ceniza y de la rapidez de hidratación del cemento. Que esto es así lo prueba el hecho de que la molienda de las cenizas recogidas en ciclones cambia la forma, el tamaño y la superficie de las partículas, de manera que aumenta la densidad y la homogeneidad de las cenizas, disminuye la cantidad de agua exigida y aumenta considerablemente la absorción de cal, es decir, la puzolanidad evaluada de este modo.

Uno de los aspectos en los que la puzolanidad de las cenizas se manifiesta favorablemente en la durabilidad de forma más clara, es el de la interacción expansiva y destructora entre áridos reactivos y álcalis, como se indica con más detalle en otro lugar.

En cuanto a los criterios de valoración y a los ensayos de puzolanidad, hay que decir que existen varios procedimientos para determinar el valor puzolánico de una ceniza; directos unos —basados en las resistencias—, e indirectos otros —apoyados en aspectos y consideraciones de tipo químico—.

Entre los primeros figura el método del ensayo de la resistencia de morteros con cemento portland, con cemento portland sustituido parcialmente por ceniza, y con cemento portland con la misma sustitución por un inerte —arena silícica—. Las resistencias obtenidas en cada caso sirven para situar a la ceniza entre el cemento y el inerte, y permite comparar unas con otras y comparar una consigo misma a distintas edades y para diferentes proporciones de sustitución. Este ensayo se suele hacer a 28 días, pero se ha señalado la conveniencia de hacerlo a 56, por ser menos dispersos los resultados y más significativos en cuanto a la puzolanidad real de la ceniza ensayada.

Entre los segundos hay uno consistente en el tratamiento dispersivo de la ceniza con HF 0,1 M, apenas ionizado, y en la medida de la conductividad eléctrica de la dispersión. Se forma ácido fluosilícico disociado: $\text{SiF}_6^{2-} + 2\text{H}^+$, que da lugar a una conductividad, cuyo aumento es proporcional a la cantidad de sílice disuelta de la ceniza, supuesta a su vez esta sílice soluble en ácido fluorhídrico en relación directa con el valor puzolánico de aquella. Resulta así un índice puzolánico que se corresponde con los valores de puzolanidad emanados de criterios de apreciación directa de la misma, basados en resistencias mecánicas de morteros.

Otro criterio sobre puzolanidad de cenizas lo constituyen el índice

$$K \text{ (mg/m}^2\text{)} = Q/s \times 10^3$$

en el cual Q es la cantidad de sílice S % disuelta por el tratamiento de la ceniza con molibdato, y s es la superficie específica de la ceniza determinada por adsorción de nitrógeno.

Las cenosferas vítreas ricas en C , que son las más rápidamente reactivas frente al molibdato, dan valores mayores de Q , y tanto éstas como las ricas en F dan menores valores de s y, por consiguiente, mucho mayores valores del índice K .

Se ha señalado, por otra parte, que no hay una relación al menos muy clara entre las resistencias reales de las cenizas en los cementos y la actividad hidráulica de las mismas determinada por los distintos métodos.

8. LAS CENIZAS Y LA REOLOGIA DEL HORMIGON

Una de las características más destacadas de las cenizas, que las hacen aprovechables pa-

ra su utilización en cementos y hormigones, es su capacidad de reducción de agua en las pastas, morteros y hormigones, a igualdad de plasticidad, capacidad de flujo, trabajabilidad, etc. O, lo que es equivalente, por su condición de dar pastas, morteros y hormigones más fluidos, para una misma relación agua/conglomerante. El requisito en este sentido suele ser que un cemento conteniendo ceniza exija, como máximo, el 95 % del agua requerida por el mismo cemento sin ella, para una misma trabajabilidad o trabajabilidades comparables. Así, pues, el primer efecto benéfico de las cenizas se manifiesta ya en el hormigón fresco, sin que se haya llegado a conocer a fondo la relación entre estas modificaciones y las propiedades intrínsecas de las cenizas.

Según esto, la menor relación a/c para una trabajabilidad dada, conseguida con el empleo de cenizas, podría compensar, al menos en parte, la merma de las resistencias a cortos plazos causadas por dicho empleo.

Hay que decir, inmediatamente, que según otras opiniones, las cenizas suelen exigir más agua en general; pero con algunas determinadas, en proporciones idóneas en el cemento o en el hormigón, se puede tener, para una misma relación a/c, una trabajabilidad análoga a la que se tiene sin cenizas y, a tenor de ello, resistencias en consecuencia, si bien mayores a largo plazo.

Una postura ecléctica intermedia, es la de que, según la naturaleza de las cenizas, éstas modifican la reología de las pastas reduciendo más o menos su viscosidad, y algunas (pocas) la aumentan, siempre según el sistema de medida de dicha viscosidad. A este respecto se ha opinado en algún caso que los métodos para medir la trabajabilidad son insuficientes, y más si son aplicados a cementos que contengan adiciones y/o aditivos.

Ello se debe, en gran parte, a la geometría de las partículas, es decir, a la forma esferoidal de una buena fracción de ellas en las cenizas —cenosferas—, las cuales actúan de lubricantes, a la manera de las burbujas introducidas en el hormigón por los inclusores de aire para mejorar su resistencia al hielo. Siempre y cuando, claro está, que dichas cenosferas no hayan sido totalmente destruidas por la molienda previa, o la conjunta de la ceniza con el clínker, pues en tal caso la mejora de la trabajabilidad inducida por la ceniza, responde a otros mecanismos que también son operantes en el caso anterior, como pueden ser la naturaleza de la superficie de las partículas y la finura o granulometría de la ceniza, en relación con la granulometría del conjunto cemento-ceniza-árido fino (o por mejor decir, fracción más fina del árido), y de la proporción de ceniza.

La lubricación de las cenosferas se explica porque éstas se hallan separadas de la pasta cementante, en un principio, por una película de agua —fase líquida— de mayor concentración iónica en calcio y álcalis, de la que éstos emigran a la superficie de las partículas, ejerciendo acciones osmóticas. Esto ocurre en la superficie de cualquier material puzolánico, pero dada la forma esferoidal de las cenosferas y la lisura superficial de buena parte de ellas, se facilita la formación de esas películas líquidas que son, en realidad, el verdadero lubricante interno de las pastas, del cual las cenosferas son sólo el soporte circunstancial y transitorio, como en otro lugar se indica.

La finura de las cenizas influye en la forma que cabe esperar: a mayor tamaño de partículas, mayor contenido de agua en el hormigón, con las secuelas negativas en la relación a/c, en la velocidad de endurecimiento y en las resistencias a cualquier plazo, particularmente a los cortos. Tal es una de las razones de prestar la máxima atención al residuo de las cenizas sobre el tamiz de 45 μm y de fijar para él valores límites.

Con respecto a la superficie específica, cuanto mayor es, más contribuye a mejorar la trabajabilidad del hormigón. Esto ocurre en el caso de cualquier adición en general —esco-

rias, puzolanas, fillers—, en hormigones de baja dosificación de cemento. Por ello se exige a las cenizas una superficie específica BLAINE elevada, a veces superior a 5.000 cm²/g.

La forma de las partículas, aparte de las cenosferas, influye, según que éstas se dispersen o aglomeren, con resultados un tanto contradictorios, pues parece ser que el grado de aglomeración puede llegar a influir tanto o más que la superficie específica. En la aglomeración tiene que ver la forma más o menos esferoidal de las partículas, de tal modo que —como es lógico—, a mayor esfericidad corresponde menor capacidad o grado de aglomeración, y por lo tanto mejor comportamiento reológico. Esto ha llevado a considerar como parámetro determinante de la influencia reológica de las cenizas la relación entre la superficie específica medida y la calculada a partir de la curva granulométrica, supuestas las fracciones esféricas, considerando este criterio como más informativo que el del residuo sobre el tamiz de 45 μm.

La naturaleza de la superficie de las partículas influye asimismo, pues dentro de las redondeadas o esféricas vítreas, las cálcicas son más lisas y suaves, mientras que las férricas son más rugosas. En cuanto a las demás, las hay porosas vítreas, ricas en sílice y alúmina, y, también en carbón, las cuales son las más adsorbentes y absorbentes, con las consiguientes consecuencias —en este caso no demasiado favorables— en cuanto a la exigencia y retención de agua. Las partículas de forma irregular, conteniendo cuarzo y fragmentos vítreos, suelen ser muy escasas y, por tanto, influyen menos.

Es evidente, pues, que el resultado final de la influencia de las cenizas en la reología de las pastas, morteros y hormigones depende de su finura y granulometría, de la forma y naturaleza de las partículas, y de su superficie.

Las cenizas de lignito, con una densidad aparente de 0,90 a 1,00 (frente a las de carbones bituminosos —de 1,10 a 1,25—), pese a que suelen ser las más activas desde un punto de vista químico-puzolánico, requieren mayor cantidad de agua y su capacidad de retención de la misma viene a ser el doble que la de las cenizas de otras procedencias. No son, pues, las más aptas en este aspecto.

9. LAS CENIZAS Y LA RETRACCION Y LA FLUENCIA

Sabido es que los cambios dimensionales inducen tensiones que pueden afectar a la estabilidad de las estructuras. Estas tensiones pueden ser de origen externo —cargas de servicio y/o interacciones físicas y/o químicas del hormigón con el medio—, y de origen interno del propio hormigón —acciones intrínsecas de o entre sus materiales—.

Entre las interacciones físicas del hormigón con el medio ambiente están los cambios de temperatura, los cuales afectan al hormigón a través de su coeficiente de dilatación térmica, y los cambios de humedad relativa, los cuales le afectan a través de su retracción hidráulica o de secado. El coeficiente de dilatación térmica y la retracción hidráulica del hormigón dependen de la naturaleza de sus materiales y del hormigón mismo. En particular, el contenido o no de cenizas en el hormigón, y la cuantía de éstas, en su caso, influyen en la retracción libre, en la fluencia y en las propiedades elásticas del material.

Es un punto un tanto controvertido el de si las cenizas aumentan o disminuyen la retracción. Ante todo habría que precisar a qué tipo o tipos de retracción se hace referencia en cada caso (autógena o intrínseca química, irreversible; térmica y/o hidráulica de secado, reversibles —al menos en parte— y de naturaleza física; o plástica). También habrá que indicar a qué condiciones (termo-higrométricas entre otras) se refiere un tipo de retrac-

ción dado. Por ejemplo, la retracción autógena o intrínseca es independiente de la temperatura, de la humedad relativa y de la carga, mientras que la hidráulica depende de las dos primeras y la térmica, naturalmente, de la temperatura.

Es sabido que la retracción en general y la hidráulica en particular aumenta con la finura del cemento. La adición de ceniza parece hacer disminuir la retracción intrínseca, en cuantía dependiente de la naturaleza y proporción de la ceniza añadida. En lo que respecta a la de secado, hay opiniones en el sentido de que, a temperatura constante, las cenizas generalmente la hacen aumentar (a pesar de producir una disminución de agua de amasado), dependiendo asimismo el aumento de la naturaleza y proporción de la ceniza.

La retracción de secado en el caso de hormigones de cemento portland, tanto con cenizas como sin ellas, se ha querido relacionar con la resistencia nominal del hormigón a 28 días, en el sentido de que a mayor resistencia debe corresponder mayor retracción, a pesar de que, tanto para unos hormigones como para otros, las mayores resistencias a 28 días implican relaciones a/c menores. Así, pues, la retracción estaría, respecto de la relación a/c, una vez más, en contra de lo usual.

La retracción última de hormigones de la misma trabajabilidad hechos con el mismo cemento, con y sin ceniza, es proporcional al contenido total de conglomerante (cemento más ceniza) *en volumen*, e independientemente de la naturaleza de la ceniza.

Los dos asertos anteriores son importantes, ya que se suelen proyectar los hormigones por su resistencia a 28 días, pues indican que las diferencias de retracción son causadas por variaciones del contenido equivalente de cemento, necesario para una determinada resistencia R_{28} .

Parece como si para cada ceniza hubiera una proporción óptima de sustitución de cemento, por debajo de la cual la resistencia a los ciclos alternativos de humectación y secado de los hormigones de cemento con ceniza es igual o menor que la de los hormigones con cemento sólo, en términos de las variaciones longitudinales acumuladas. De ser así, se podría explicar por el llenado de los vacíos intersticiales a causa de la acción puzolánica de la ceniza, lo cual —se piensa— podría justificar el uso de la ceniza, aún sin tener en cuenta el factor de ahorro energético que su utilización comporta.

Otras opiniones, por el contrario, afirman que la retracción de secado disminuye en las pastas y en un 30 % o más en hormigones con cenizas —dependiendo del contenido de éstas y de la relación a/c—, los cuales presentan por ello una menor tendencia a la fisuración, sobre todo si se someten a un buen curado que evite pérdidas de agua por desecación. En el pretensado ello evita la pérdida de tensión y la aparición de flechas.

Ello se atribuye en el caso de las pastas, en parte, a una diferencia entre los calores de hidratación con cenizas y sin ellas, pero cabe pensar si no será debido, además, a otras diferencias entre las mismas, en lo que se refiere —aparte de la propia retracción—, a la resistencia a la tracción, al módulo de elasticidad (deformabilidad) y a la fragilidad.

Se ha definido la fragilidad estimada como la relación:

$$F = 10 R_T/R_C$$

donde R_T y R_C son respectivamente las resistencias a tracción y compresión del material; y la deformabilidad como la relación

$$D = 10^6 \cdot 1/E$$

donde E es el módulo elástico del material.

Pues bien, a mayor contenido de ceniza en el cemento o en el hormigón corresponde una mayor fragilidad y una mayor deformabilidad de éste, lo que, unido a una menor retracción de secado, sí explicaría la menor tendencia a la fisuración de los hormigones con cenizas.

La reducción de la retracción por utilización de cenizas, en función de la proporción de éstas en el cemento o en el hormigón, exige un sacrificio de la resistencia inicial y tal vez un tiempo mayor de desencofrado, lo cual lleva a un compromiso, según los casos. Por ejemplo, en el caso del revestimiento de un túnel en el que se requería un hormigón denso, impermeable y durable (frente a aguas agresivas), y de gran resistencia, lo que a su vez exigía una relación a/c baja, se pasó de una dosificación mínima de cemento portland de 350 kg/m³ y una relación a/c menor de 0,53 —con peligro de fisuración— a una dosificación análoga pero con 20 % de cemento sustituido por ceniza, y finalmente a otra de 350 kg/m³ de una mezcla de cemento/ceniza de 2/3:1/3, con una relación a/c de 0,50, apta para el bombeo y con mejores características en todos los aspectos, en particular el del bombeado y el de la retracción y fisuración.

La fluencia depende en parte de la pasta —más consolidada a mayor edad—, pero influye también en ella el módulo de elasticidad del árido grueso. La fluencia parece ser análoga para hormigones con contenidos de ceniza comprendidos entre 0 y 20 %, y también para los de contenidos comprendidos entre 30 y 50 %, pero algo mayor la de estos últimos que la de los primeros.

Otros datos aseguran que la fluencia se reduce a largo plazo en un 20 a 40 %, por las mayores resistencias mecánicas alcanzadas a dichos plazos con cementos u hormigones que contienen de 25 a 35 % de ceniza, dependiendo de la calidad de la misma y del curado de los hormigones.

La influencia global favorable de las cenizas en la retracción, la fisuración, la fluencia y en las propiedades elásticas, hace que cada vez se hayan empleado más y mayores dosis (que han pasado de 20-40 % a 50-60 %) como adición al cemento o como sustitutivo del mismo en el hormigón, en aquellas obras en las que, como en las presas, calzadas, solados y pavimentaciones, existe peligro de fisuración (agrietamiento) por contracciones térmicas y tensiones de retracción de secado, por exposición de las superficies a la intemperie, y donde pueda ser operante la retracción intrínseca o autógena del conglomerante.

Otros efectos de la ceniza parecen ser el de reducir ligeramente la expansión térmica del hormigón —mayormente dependiente del árido grueso—, así como la fluencia, pero en el caso de ésta, tanto menos cuanto mayor es la edad a la que opera la carga.

En cuanto a la expansión térmica, a igualdad de resistencia a 28 días y de trabajabilidad no se ve clara la influencia que puede ejercer el tipo de ceniza, pues los respectivos coeficientes de los cementos portland con y sin cenizas permanecen constantes a todas las edades. Esto es raro, pues parece que dicho coeficiente debería aumentar con la riqueza de conglomerante. La explicación puede ser que esto es lo que realmente sucede en las pastas; pero que en los hormigones puede ser muy distinto.

No obstante, parece ser también que el coeficiente de dilatación térmica de los hormigones de cemento con ceniza son algo menores —lo cual explicaría la ligeramente menor expansión térmica de estos hormigones—. La explicación podría ser la acción puzolánica de las cenizas, por la cual aumenta la masa cristalina en la pasta y en el hormigón, lo cual reduce la presión de hinchamiento; por otra parte, el coeficiente de dilatación térmica es máximo para un estado intermedio de humedad en el hormigón, circunstancia que obra-

ría en favor de los hormigones con cenizas. Sin embargo, la explicación no parece ser muy convincente.

Finalmente no faltan opiniones, según las cuales las deformaciones por retracción libre son análogas para hormigones con y sin cenizas.

En cuanto al módulo de elasticidad del hormigón, influido por el de la pasta cementante y función de la edad y de la proporción de huecos (bien procedan de exceso de agua de amasado o de lixiviación de la cal, en su caso), es aproximadamente el mismo en hormigones sin ceniza que en los que la contienen en proporciones de 20 y 25 %. Siempre que se trate de una ceniza límite, la reducción de agua de amasado y la fijación de cal por efecto puzolánico pueden afectar al módulo de elasticidad, evitando una disminución sustancial del mismo.

10. LAS CENIZAS Y LA DURABILIDAD

No siempre —o por mejor decir, casi nunca— los cementos portland ordinarios son los más durables en condiciones ambientales o de medio agresivas.

El efecto benéfico de las cenizas en la durabilidad del hormigón responde a factores de índole física y química, íntimamente unidos y operantes en el mismo sentido.

Factores de índole física son la mayor densidad, compacidad, impermeabilidad e impenetrabilidad a los iones, que las cenizas aportan al hormigón, como consecuencia de su efecto reductor de agua para una consistencia y trabajabilidad dadas, y como consecuencia de ser la durabilidad dependiente de la permeabilidad, función a su vez del grado de hidratación y de la proporción de huecos, y de la capilaridad creada por exceso de agua de amasado.

Téngase en cuenta a este respecto, que uno de los problemas planteados por la durabilidad es el de evitar o eliminar el exceso de agua innecesaria para la hidratación del cemento, pero imprescindible para la manipulación del hormigón. La oclusión de los capilares de la pasta de cemento y del hormigón requiere mucho tiempo, a partir de relaciones $a/c = 0,60$, lo cual es nocivo para la durabilidad a plazo corto y medio, sobre todo en condiciones de agresividad externa. Y que la conocida solución de este problema a base de aumentar la dosificación de cemento es cara e implica incrementar el calor de hidratación, la retracción térmica e hidráulica y la fluencia, lo cual va a su vez en contra de la propia durabilidad; por lo cual, la solución más idónea puede venir dada por el correcto empleo de una ceniza adecuada, no como simple sustitutivo del cemento, sino como un material puzolánico cementicio per se, con las propiedades y comportamientos descritos en otros puntos, ya que la mejora de la impermeabilidad que una ceniza confiere al hormigón es mayor que la conferida por una cantidad equivalente de cemento, sobre todo en el caso de hormigones pobres.

Esto tiene su importancia porque, al fabricarse cada vez mejores cementos portland —más resistentes—, se tiende a reducir la dosificación de cemento y/o a aumentar la relación a/c en los hormigones, ya que, bien por facilidad o bien por rutina, no se considera el control de éstos sino a través de la resistencia mecánica a 28 días, y no por los valores de la dosificación y de la relación a/c . Por ejemplo, se cita que en Inglaterra, entre 1939 y 1981, para hormigones de $32,5 \text{ N/mm}^2$ con 190 litros de agua por metro cúbico, la dosificación de cemento descendió de 395 a 245 kg/m^3 , con un “ahorro” de cemento que llegó a ser de 38 %, mientras que la relación a/c aumentó de 0,48 a 0,78.

Las cenizas tienen una densidad que es aproximadamente $2/3$ de la del cemento, por lo que al sustituir a éste peso por peso en el hormigón, se incrementa el volumen de material cementicio total (con mayor cantidad de pasta para menor contenido de portland) para una trabajabilidad equivalente, con lo cual se aumenta la cohesión y se reduce la exudación y la segregación. Esto permite facilitar el transporte, el vertido y la puesta en obra en general, así como mejorar el acabado superficial del hormigón, pero en todo caso coadyuva a la mayor homogeneidad y mejor calidad de éste, lo cual se deja sentir muy favorablemente a efectos de la durabilidad en general.

Así, pues, la reducción de la permeabilidad y de la penetrabilidad del hormigón por las acciones de las cenizas es un factor (físico) común que beneficia al material desde el punto de vista de la carbonatación, de la resistencia a sulfatos, agua de mar, aguas puras (blandas), ácidas y carbónicas agresivas, y en cuanto a la reacción árido-álcalis, y todo ello con independencia —en cada caso respectivo—, del contenido de C_3A o de álcalis —N equivalente— del cemento.

Factor de naturaleza química es el carácter puzolánico de las cenizas.

La mayor resistencia a los sulfatos suele corresponder siempre a aquellas cenizas que muestran mayor valor puzolánico, es decir, a las de carbones antracíticos-bituminosos, más ácidas, siendo menor —y a veces nula o negativa— la de las de carbones sub-bituminosos y ligníticos, más básicas. La acción positiva de las cenizas de carbones bituminosos se da con cualquier tipo de cemento (I, V o II ASTM), pero el efecto es tanto más espectacular, en cierto modo, cuanto menos resistente a sulfatos es el cemento —el efecto es decreciente en el orden señalado—.

Ello es debido a que la cal de hidrólisis del cemento, que se combinaría con los sulfatos de las aguas, suelos y terrenos dando productos expansivos —yeso y/o ettringita—, y/o con las aguas carbónicas agresivas dando bicarbonato cálcico soluble y produciendo un deslavado o lixiviación de cal en el hormigón —sobre todo si hay percolación de agua exterior a través del mismo—, se reduce considerablemente al combinarse con la ceniza por la acción puzolánica de ésta (factor químico). También contribuye a estos efectos la mayor impermeabilidad e impenetrabilidad a los iones que la ceniza confiere al hormigón (factor físico), como ya queda indicado. La mejora en este sentido depende cuantitativamente de la naturaleza de la ceniza, de una buena dosificación de ésta en el cemento o en el hormigón, y de una buena compactación y curado.

Las cenizas en los cementos, en proporciones de 25 ó 30 % —otros criterios señalan un mínimo de 25 %—, confieren a éstos resistencias a los sulfatos análogas a las de los cementos portland específicamente resistentes a los mismos —con 2-5 % de C_3A — a los que han llegado a sustituir, y desde luego mucho mayores que las de los cementos portland ordinarios —con más de 8-9 % de C_3A —. Por ello los cementos con cenizas tienen aplicación en usos específicos tales como desagües, revestimientos de túneles y plantas de tratamientos de aguas, aparte de los hormigones resistentes a aguas y terrenos yesíferos. Se ha llegado a hacer prescriptivo el uso de hormigones de cemento portland con cenizas en determinadas partes de obra de las centrales nucleares, en sustitución del cemento portland a igualdad de peso, o con un exceso de 10 % en el caso de cemento con cenizas.

La explicación de todo ello reside en varios puntos: primero, la dilución del C_3A del cemento; segundo, la mayor impermeabilidad del hormigón, por un mayor contenido de material conglomerante (pasta: cemento + ceniza); tercero, la menor cantidad de cal de hidrólisis necesaria para la formación de ettringita expansiva, por un lado, por la menor proporción de cemento —clínker— en el conglomerante total, y, por otro lado, por el efec-

to puzolánico de fijación estable de buena parte de dicha cal, sobre todo a largo plazo; y cuarto, la propia combinación de la ceniza con el gel formado por el aluminato tricálcico, reduciendo su reactividad con los sulfatos.

Por otra parte, los cementos con cenizas producen mayor cantidad de monosulfo-aluminato que los cementos portland ordinarios sin ellas, tal vez porque el grado de hidratación del C_3A en los primeros es mayor, a causa de la mayor disponibilidad de espacio para la hidratación y precipitación de los hidratos formados, y por la aportación de iones Al por parte de la ceniza.

Las cenizas, como se ha indicado, no sólo mejoran la durabilidad del hormigón frente a sulfatos, sino también frente a aguas blandas y ácidas (pH 4) y a aguas de mar. Aun mejores resultados se obtienen a estos efectos con un conglomerante ternario consistente en una mezcla con un 30 % de un cemento siderúrgico 50:50 y un 70 % de una ceniza, es decir, un 15 % de clínker, un 15 % de escoria y un 70 % de ceniza, lo cual indica el efecto positivo de la interacción de los tres componentes.

Hay, sin embargo, un aspecto de la durabilidad en el que las cenizas apenas procuran o no procuran mejora al hormigón: la resistencia al hielo. Esto puede ser debido a que, si bien los elementos ácidos de la ceniza reaccionan con la cal de hidrólisis del cemento para formar compuestos tobermoríticos por acción puzolánica, impartiendo al hormigón mayor homogeneidad y compacidad, ello puede afectar, sin embargo, al número, tamaño y distribución de poros, con aumento de los capilares más finos que ejercen por ello una mayor absorción de agua por succión. No obstante, esta influencia a veces negativa de la ceniza es muy escasa para contenidos de la misma inferiores al 15 %, pero para una relación cemento/ceniza dada es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de ceniza. El comportamiento negativo mejora con la aportación de aire ocluido en el hormigón, pero, por las razones expuestas en otro lugar, se requiere mayor cantidad de aditivo incluso de aire que en el caso de un cemento sin ceniza.

Otro aspecto muy destacado de las cenizas en la durabilidad es el de la reacción expansiva árido-álcalis que a veces tiene efectos destructivos. La expansión se ha atribuido al hinchamiento de un gel de silicato alcalino, o a la presión osmótica a través de una membrana de silicato cálcico-alcalino, ambos formados por los álcalis totales del hormigón, pero principalmente por los del cemento (y sobre todo los solubles y los movilizables por intercambio catiónico), al reaccionar con la sílice reactiva de los áridos y disponer de agua para la imbibición o la ósmosis. Las cenizas evitan o atenúan el proceso, al conferir mayor impermeabilidad al hormigón y por una acción dispersiva sobre las reacciones (efectos físicos), y/o por captación de álcalis por parte de algunas cenizas y acción puzolánica (efectos químicos).

Un 10 % de ceniza en el cemento da, a los efectos, mejor resultado que el empleo de un cemento portland ordinario de bajo contenido de álcalis, resolviendo el problema siempre, y no sólo precisamente por un efecto de dilución del cemento y de sus álcalis, sino también en razón directa del valor puzolánico de la ceniza.

Otro aspecto más en el campo de la durabilidad lo constituye la carbonatación, en cuanto a la extensión y penetración de la misma, y a la velocidad con que se produce. Tanto la carbonatación superficial —hasta 1 cm por debajo de la superficie del hormigón— como la total, se sabe que dependen mucho del estado higrométrico —de desecación— previo del hormigón; y se sabe también que la intensidad y velocidad de la carbonatación son tanto menores cuanto mayor es el tiempo de hidratación anterior a la desecación del hormigón. Pues bien, la ceniza en el cemento reduce la velocidad de desecación y carbonatación del hormigón en relación con la de otro análogo que contenga cemento sin ceniza.

Ello es un efecto más de la reducción de porosidad y de la densificación del hormigón por colmatación de los poros, a causa de la acción puzolánica de la ceniza, todo lo cual impide y dificulta tanto la penetración de líquidos e iones como la de gases —CO_2 en este caso—.

La cuantía de la carbonatación es a veces mucho mayor que la que cabe esperar del CH producido por la hidratación del portland, lo cual es debido a la carbonatación parcial de los compuestos hidratados de tipo tobermorítico $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$, tal vez más rápida que la del propio CH. Por esta razón la tinción con fenolftaleína pone de manifiesto más bien la neutralización —carbonatación exclusiva del CH— que la carbonatación total —la anterior más la de $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$ y tal vez también la de algunos aluminatos—. Todas estas carbonataciones son impedidas o dificultadas por las cenizas.

Finalmente, otro aspecto mixto de la influencia favorable de las cenizas en la durabilidad, es el de su efecto en las porosidades capilares y de gel de la pasta, las cuales dependen a corta edad de la densidad de la ceniza —factor físico—, y a edades largas de la puzolanidad —factor químico—. Todo ello contribuye a producir poros de mayor tamaño, aunque tal vez más numerosos, y a la progresiva colmatación de los mismos, lo cual dificulta a la larga la permeabilidad y la penetrabilidad global de líquidos e iones, propendiendo en suma a favorecer la durabilidad en general; aunque tal vez también por ello aumente algo la succión o ascensión capilar del agua, lo cual explicaría la igual o menor resistencia al hielo en particular, como ya se ha indicado, sobre todo a edades tempranas del hormigón.

11. LAS CENIZAS Y LA CORROSION DE LAS ARMADURAS

Se dice que el empleo de cenizas implica riesgo de reducir la pasividad del acero y de inducir corrosión, por suprimir o reducir la cal de hidrólisis por acción puzolánica.

Hay que señalar, no obstante, que esta acción no hace disminuir el pH, y que para bajar el pH de 12,6 a, aproximadamente, 9,5 en el límite, habría de desaparecer casi la totalidad de la cal de hidrólisis, supuesto, además, que sólo ésta mantuviera alto el valor del pH.

De hecho, en hormigones de cemento portland con relación de cemento/ceniza = 80:20 y sin cenizas, y en pastas sin ellas y con ellas en proporciones cemento/ceniza 3,20:1,00 y 2,20:1,50, se observaron al cabo de unos dos años valores del pH de la pasta comprendidos entre un máximo de 13,0 y un mínimo de 11,1, indistintamente.

Lo que puede suceder es que, ante una acción externa por aguas ácidas o carbónicas agresivas, con percolación del hormigón, o ante cualquier otro tipo de ataque del exterior que de un modo u otro cause los mismos efectos, la cal de hidrólisis restante —reserva alcalina— llegue a desaparecer totalmente, con lo cual el pH podría bajar y la pasividad desaparecer, produciéndose corrosión.

Pero eso sucedería en hormigones muy porosos y penetrables —defectuosos de origen— y, más pronto o más tarde, tanto en los que contiene ceniza —u otra adición cualquiera—, como en los que no la contienen.

En general, el riesgo de corrosión de armaduras es prácticamente el mismo en hormigones con unos u otros cementos —con y sin cenizas—, si la dosificación es suficientemente alta en todos los casos y las condiciones ambientales y de servicio son comparables.

12. LAS CENIZAS Y LOS ADITIVOS PARA HORMIGON

Las cenizas influyen en la dosificación, control y efectos de los aditivos y, en particular, de los agentes inclusores de aire, fluidificantes y superplastificantes. En estas influencias juega un papel importante el contenido de carbón, el tamaño, superficie específica y porosidad de sus partículas y, en definitiva, su capacidad de adsorción.

Los efectos del contenido de carbón se hacen notar más en y por el aire ocluido por el hormigón que por la cuantía de aquél. Por esta razón también la acción de los superplastificantes varía con la naturaleza de las cenizas.

La combinación de superplastificantes y cenizas en el hormigón permite obtener mayores resistencias a corto y largo plazo que con cementos portland ordinarios, en hormigones de igual trabajabilidad. Con ello se contrarresta el inconveniente de las menores resistencias a uno y pocos más días de los cementos con cenizas, en relación con los portland ordinarios solos, sin perjuicio de un mayor aumento, aunque lento, de las resistencias de los primeros con el tiempo. El efecto es mayor en compresión que en tracción.

Los superplastificantes combinados con las cenizas dan asimismo hormigones de mucho menor retracción (del orden de 1/3 menor), a causa de la menor relación agua/conglomerante (cemento más ceniza) y de la menor proporción de cemento (clínker) en la pasta, y porque al ser lenta la acción puzolánica de la ceniza y tener menos agua la pasta, una parte de ésta (cemento más ceniza) queda sin hidratar, haciendo el conglomerante anhidro provisionalmente de árido, con lo cual a mayor contenido circunstancial de árido y menor de pasta hidratada corresponde un desarrollo menor y más lento de la retracción. Esto tiene una gran importancia en el caso del hormigón pretensado, puesto que evita pérdidas de tensión de los alambres.

La acción de la ceniza y/o del superplastificante hace aumentar algo el hinchamiento del hormigón bajo agua.

Esto es congruente con la menor retracción hidráulica de secado, pues el hecho en ambos casos puede estar relacionado con una menor velocidad de endurecimiento.

La fluencia, a los efectos, sigue la misma pauta que la retracción, siendo menor, tanto en agua como en aire, en el caso del hormigón con cemento, ceniza y superplastificante, que en el caso del cemento sólo; pero mayor en el hormigón con cemento y ceniza (sin aditivo), tal vez por el mayor hinchamiento.

Por otra parte, esta acción conjunta supone un compromiso entre el efecto benéfico de una mayor resistencia a 1 día del hormigón de cemento portland ordinario con aditivo, y la menor del mismo hormigón con ceniza, y el aumento de resistencia a partir de 28 días, mucho mayor para el segundo que para el primero. Esto sucede lo mismo para la tracción que para la compresión, que para el módulo de elasticidad estático.

13. LAS CENIZAS Y LOS TRATAMIENTOS TERMICOS EN LA PREFABRICACION DE PIEZAS DE HORMIGON

En los tratamientos higrotérmicos del hormigón con vapor libre la resistencia decrece al aumentar la proporción de ceniza en el cemento o en el hormigón, mientras que en los tratamientos a presión en autoclave primero decrece y luego crece, dentro de ciertos límites.

Así sucede que, si bien las sustituciones de cemento por ceniza en el hormigón ordinario

pueden llegar a ser del 30 %, siendo aconsejables, en general, las de 18-20 %, en el hormigón para tratamiento en autoclave pueden alcanzar el 50 %, si bien se recomiendan las de 25 por ciento.

El contenido de sulfatos de las cenizas parece favorecer a las resistencias obtenidas en los tratamientos de autoclave, sobre todo en el caso de sustituciones grandes de cemento por ceniza.

14. CENIZAS, CLINKER Y CEMENTO

Se ha planteado el problema del cemento —o del clinker— más adecuado para una ceniza dada, en vista del diferente comportamiento de diversas cenizas con cementos distintos. En este sentido no parecen estar muy claras las características que debe reunir el mejor cemento para una determinada ceniza, habida cuenta de las muchas y diferentes variables que intervienen, constituidas por factores físicos, químicos y mixtos.

Dado que con las sustituciones normales de clinker o cemento por ceniza (hasta 30 %), la fase líquida de la pasta cementante y el agua de los poros intersticiales se encuentra saturada de CH, como en el caso de la pasta de cemento portland ordinario, cabría esperar que la reactividad de una ceniza fuese independiente del clinker o cemento al que sustituye, y sólo dependiera de su propia actividad puzolánica. Sin embargo, ello no es así, como se verá.

Ensayos hechos con varios cementos y cenizas en proporciones 80:30, en morteros con distintas relaciones a/c sometidos a distintos curados en agua a diferentes temperaturas, han puesto de relieve que las acciones de las cenizas dependen de los cementos, pudiendo ser las diferencias observadas atribuibles, al parecer, a los distintos efectos ejercidos por las cenizas en la velocidad e intensidad de las reacciones de hidratación de las diferentes fases de los cementos. En efecto, la acción dispersante del “polvo fino” de las cenizas hace crecer la velocidad de hidratación de los silicatos del cemento portland, aumentando los sitios de precipitación de CH y de $C_xS_yH_z$ de la fase líquida. Esta acción para el caso del C_3S parece tener lugar a partir de las 12 horas. De este modo, la eficacia del cemento portland frente a la ceniza aumenta con el contenido total de silicatos de aquél, y, consecuentemente, disminuye con el contenido total de aluminatos. Así también, las diferencias (pequeñas) de eficacia de las cenizas se deberían al distinto grado de dispersión que ejercen en el cemento en función de su finura.

La observación ha llevado a concluir que con una buena ceniza se saca relativamente mejor partido de un cemento peor que de otro mejor, y recíprocamente. Sin embargo, también se ha observado que las resistencias de los morteros de cemento con cenizas eran menos dependientes de los propios cementos que en el caso de morteros con cementos portland exentos de cenizas, de donde parece poderse deducir que no debe haber un gran interés en seleccionar un clinker especial determinado para una ceniza dada, sobre todo en cuanto se refiere a las resistencias a largo plazo.

Aparte de ello, la acción de la ceniza en cada caso puede depender de las proporciones de mezcla con el cemento y del binomio cemento-curado, puesto que del curado sólo no parece depender demasiado, según opiniones.

A veces, la menor reactividad de una ceniza puede verse compensada por su contribución a la resistencia a largo plazo, incluso mayor que la del propio cemento, aparte de otras ventajas señaladas en otros lugares.

En todo caso, el ensayo aislado de una ceniza sola es insuficiente, puesto que todas ellas

dan comportamientos variables con cementos diferentes. Por otra parte, una misma ceniza con un cemento mejor y otro peor no da comportamientos más distintos que los atribuidos a otras variables.

La adición de cenizas al clinker en fábricas de cemento, para obtener cementos con cenizas, se puede hacer por molienda conjunta de ambos componentes, o por mezcla aparte del cemento —clinker molido previamente—, con la ceniza, tal cual, sin molturación previa de ésta. Aparte de estos procedimientos de mezcla y homogeneización “en seco”, está el método de utilización directa de la ceniza en obra —o en central hormigonera—, por mezcla “en húmedo”, al añadirla —molida o no— en la amasadora, con el agua y los demás componentes del hormigón.

Este último procedimiento tiene inconvenientes, entre los cuales cuenta la necesidad de disponer en obra de silos separados para las cenizas y para el cemento, con el riesgo —real y consumado en algún caso— de confundir unos silos con otros. Aparte de ello existen problemas circunstanciales de suministro, descarga de los propios silos, dosificación, homogeneidad y regularidad de las mezclas, control de las mismas, etc.

La adición directa de las cenizas al hormigón puede tener efectos diferentes según el origen de la ceniza y su condición de molida previamente o no. Se ha visto que cenizas recogidas en precipitadores electrostáticos, así como las recogidas mecánicamente en ciclones, pero molidas, mejoran la plasticidad de la pasta de cemento fluidificándola, en relación con la pasta del mismo cemento sin ceniza; mientras que esas cenizas de ciclones, añadidas sin molienda previa, no producen fluidificación, o la producen en mucha menor escala. Parece deducirse de ello que el aumento de finura por molienda de dichas cenizas mejora su comportamiento en el aspecto señalado, así como también en la resistencia, densidad, impermeabilidad, durabilidad y retracción del hormigón.

Sin embargo, se ha dicho por otra parte que la molienda de las cenizas destruye las cenosferas y rebaja el poder reductor de agua de las mismas, restándoles así parte de una de sus principales características que responde a mecanismos explicados en otros lugares.

Hay que puntualizar a este respecto que, como ya se ha indicado, hay dos mecanismos de fluidificación: las cenosferas y la finura. Para ser operante el primero de ellos deben existir cenosferas en una cierta proporción, y ello depende de la naturaleza e historia térmica de las cenizas. Es evidente que una ceniza sin cenosferas, o con pocas cenosferas, puede fluidificar más molida que sin moler; mientras que a otra abundante en cenosferas podrá sucederle lo contrario. De ahí las diferencias y aparentes incongruencias que a veces se observan en la bibliografía, al describir mejores trabajabilidades, mayores reducciones de agua y de las relaciones a/c, y mayores resistencias en algunos casos de molienda conjunta, o de mezcla separada de cementos con cenizas molidas o no, en otros casos.

En lo que respecta a las proporciones con que la ceniza se utiliza para ser molida con el clinker o mezclada con el cemento en fábrica, éstas son variables según los países y sus normas.

En general, se suelen preparar dos tipos de cemento, con contenidos bajos y altos —relativamente hablando— de cenizas. Los primeros suelen contener 20 % o menos, y son los correspondientes a los llamados cementos “a la puzolana”, equivalentes a los cementos PA con puzolana o ceniza de las Normas Españolas. En realidad, los límites para estos cementos pueden oscilar entre 15 y 35 %. Los segundos pueden contener hasta 40 % o más, y son los correspondientes a los llamados cementos puzolánicos, equivalentes a los cementos PUZ-II de las Normas Españolas.

En lo que respecta al ahorro de energía que en la fabricación de cemento se puede conseguir con la adición de cenizas al clínker, se puede hacer un cálculo somero, así: en un proceso de clínkerización que consuma 900 kcal/kg de cemento portland producido se invierten 150 kg de carbón de 6.000 kcal/kg, por tonelada de cemento. Si en éste se sustituye un 25 % por cenizas, el ahorro por tonelada de cemento con ceniza producida será en principio de 37,5 kg de carbón (25 %) —equivalentes a 225.000 kcal—, es decir de 225 kcal/kg de cemento, quedando reducido el consumo total de 900 kcal/kg a 675 kcal/kg (75 %). En una palabra, el ahorro en combustible —o en calorías— sería proporcional a la sustitución de cemento por ceniza.

Por otra parte, la molienda de ceniza sola da un rendimiento en t/hora mayor aún que el del clínker solo —y, sobre todo, con un consumo energético sustancialmente menor—, con lo cual la utilización de la ceniza para cemento en fábrica, en una u otra forma —molienda conjunta o molienda por separado—, supone un significativo ahorro de kilovatios hora; también añadida en obra, y más aún si no se muele previamente.

En el 7.º Congreso Internacional de Química de los Cementos, de París en 1980, se señaló que para contenidos de cenizas hasta un 15 % la molienda conjunta es óptima, mientras que para proporciones mayores es mejor la separada; y que un reparto conveniente de la energía total de molienda entre el clínker y el yeso por un lado, y la ceniza por otro —debe entenderse un acoplamiento de las finuras de los materiales para conseguir una curva granulométrica óptima del conjunto—, puede proporcionar un incremento considerable a las resistencias a corto plazo de los cementos con cenizas.

Finalmente, la relación entre la superficie específica de la ceniza y la del cemento tiene gran importancia, pues la primera debe ser siempre mayor que la segunda, ya que en el caso opuesto pueden ocurrir las cosas al revés y encontrarse resultados aparentemente contradictorios en el comportamiento de las cenizas y/o de los cementos. No es, sin embargo, éste el único factor decisivo, sino que lo son también la forma de las partículas de ceniza, la naturaleza de su superficie y masa, y la distribución granulométrica de las mismas, como ya se ha puesto de manifiesto.

15. CENIZAS Y HORMIGÓN

El ahorro de energía por m³ de hormigón fabricado, de utilizar cenizas a no utilizarlas, se ha valorado alrededor del 20 %, lo cual está bastante en consonancia con el ahorro previsible en la fabricación de cemento; tal vez algo menor, pero ello es lógico.

Naturalmente, este ahorro depende de la proporción de ceniza sustituyente de cemento, del precio de la misma y del costo del transporte, aparte amortización de instalaciones de almacenamiento y manipulación en obra. En promedio, y para las proporciones de sustitución más usuales, viene a ser el indicado.

La sustitución de cemento por ceniza en el hormigón se puede hacer por volumen o por peso, con mejora de la trabajabilidad en ambos casos, si bien la mejora es mayor cuando la sustitución es volumen por volumen. Es decir, para una misma sustitución porcentual dada, se obtiene una trabajabilidad mejor cuando la sustitución es en volumen.

Ello es así en función de las características que presentan cada uno de ambos tipos de sustitución, y que son las que siguen:

A igualdad de volumen de sustitución, la relación superficie/volumen de las partículas sólidas en la pasta es menor cuanto mayor es el contenido de ceniza. En efecto, al ser me-

nor la densidad relativa de la ceniza, a igualdad de volumen el peso del cemento sustituido es mayor que el de la ceniza sustituyente; y supuesta una superficie específica aproximadamente igual —por exigencia— para el cemento y para la ceniza, la superficie del cemento sustituido es mayor que la de la ceniza sustituyente, luego la superficie total disminuye con la sustitución, para igual volumen total de sólido, el cual no ha cambiado. Es decir, la relación superficie/volumen de sólido ha disminuido.

En tales condiciones, a constancia de volúmenes totales de agua, material cementante y árido en el hormigón, la superficie total mojable del material cementante es tanto menor cuanto mayor es la proporción de cemento sustituido por ceniza, con la consiguiente reducción de agua y mejora de la trabajabilidad. O, de otro modo, para una misma trabajabilidad mantenida, la reducción de agua de amasado será tanto mayor cuanto mayor sea la sustitución de cemento por ceniza.

A esto hay que añadir el efecto lubricante de las partículas esféricas de la ceniza, del cual no hay correspondencia en las del cemento por su forma irregular, aunque las partículas de uno y otra sean de tamaño comparable.

A igualdad de peso de sustitución la relación superficie/volumen del sólido en la pasta tiende a aumentar en relación con el caso anterior a medida que aumenta el contenido o concentración de ceniza. En efecto, por la menor densidad de la ceniza en relación con el cemento, a igualdad de peso de sustitución es mayor el volumen de la ceniza sustituyente que el del cemento sustituido; y, supuesta como en el caso anterior una superficie específica prácticamente igual para ambos, la superficie total no habrá cambiado con la sustitución para igual peso total de sólido, invariable en este caso. Es decir, no habrá disminuido como en el caso anterior. En este aspecto, al aumentar el volumen de sólido y mantenerse la superficie total, pero en un valor más alto que en el caso anterior, la relación superficie/volumen de sólido disminuye también, como en dicho caso, pero relativamente menos, por lo cual se mantiene más alta que en el mencionado caso.

En tales condiciones, a constancia de pesos totales de agua, material cementante y árido en el hormigón, la superficie total mojable del material cementante es la misma, pero el volumen o concentración de éste es mayor —o la concentración de agua y árido menor— con lo cual se reduce también el agua de amasado o se mejora la trabajabilidad, pero menos que cuando la sustitución de cemento por ceniza es en volumen.

También en este caso la disminución relativa de la trabajabilidad —o, más correctamente dicho, la menor mejora de la misma en relación con el caso anterior—, se ve contrarrestada por la, en este caso, mayor concentración de cenosferas en la pasta.

Como quiera que sea y, en conclusión, también se consigue una mejora general de la trabajabilidad cuando en el hormigón se sustituye el cemento por la ceniza, peso por peso, es decir, cuando aumenta el peso de la ceniza, en el caso de altos porcentajes de reemplazo del cemento por ésta.

La sustitución en peso de cemento por ceniza causa un mayor efecto en la reología —trabajabilidad— del hormigón cuanto menor es la dosificación de cemento en el mismo, por mayor incremento relativo del volumen del material cementante total que ello supone. En efecto, para dosificaciones altas de cemento el volumen de la pasta es mayor que el de los huecos entre los áridos y la reología del hormigón se rige por la de la pasta; pero para dosificaciones muy bajas puede ser que no haya pasta bastante para rellenar los huecos entre áridos, y éstos se tocan. En estas condiciones un aumento del volumen de la pasta sirve para separar los áridos y facilitar el flujo del material.

En cuanto a las resistencias, en general, parecen aumentar algo más con las sustituciones en volumen, sobre todo para sustituciones grandes. El hecho de que a veces se perjudique algo la trabajabilidad no impide obtener una resistencia mejor, si se procura una buena compactación.

A igualdad de trabajabilidad, tanto las sustituciones en peso como en volumen rebajan las resistencias a cortos plazos.

Si se quiere mantener constante la resistencia de distintas mezclas correspondientes a diferentes hormigones, el peso necesario de ceniza que haya de sustituir a un mismo peso dado de cemento deberá ser, evidentemente, tanto menor cuanto mayor se quiera que sea la resistencia y, sobre todo, a plazos cortos.

El uso de las cenizas en el hormigón ha permitido aplicaciones especiales de las mismas en casos específicos, particularmente de grandes obras, donde se piden características muy estrictas que exigen a veces requisitos contradictorios. Por ejemplo, en presas donde se exige una gran densidad con porosidad mínima; una perfecta unión entre tongadas; y un bajo calor de hidratación y una gran resistencia a la tracción para evitar la retracción térmica y la consiguiente fisuración, el problema se puede resolver aumentando la cantidad de pasta de cemento. Pero ello es caro, si se trata de cemento portland, aparte de que tal solución puede ser desfavorable desde el punto de vista del calor de hidratación y de la retracción (térmica e hidráulica). En tal caso la solución idónea consiste en la utilización de cenizas contenidas en el cemento, o añadidas a éste en el hormigón —como sustitutivo o como complemento—.

Cuando además se exige —como ocurre en hormigones que han de servir como encofrado para el apisonado de los paramentos— una resistencia inicial elevada, una buena durabilidad, un buen acabado superficial, así como una cierta autosustentación del hormigón fresco, alguna de cuyas características no las pueden cumplir los hormigones convencionales, si no es a base de un inadmisibles —y por varios conceptos— aumento del contenido de cemento, entonces, el recurso a las cenizas es obligado, pudiéndose utilizar mezclas al 50 % de cemento y ceniza.

Otro caso análogo lo ofrecen las sub-bases, bases y capas de rodadura de los firmes blancos o rígidos, utilizando una pavimentadora asfálticas. Esta técnica ha permitido obtener, con el uso de las cenizas, grandes ventajas. Entre ellas, reducir el espesor de la capa de rodadura —la más cara—, con un buen acabado; la de diseñar un hormigón de baja resistencia temprana para obtener una fisuración óptima —muy escasa— y una alta resistencia a largo plazo, con mejora de la capacidad portante del firme en servicio. En estos casos la proporción de ceniza en el total del material conglomerante puede llegar a rebasar el 60 %. Bien es cierto que, en todo caso, es preciso ejercer un control muy estricto en general, y del agua y el curado en particular.

En estos casos conviene también tener en cuenta la temperatura de la ceniza, en relación con la temperatura del ambiente y del hormigón, pues si son ambas altas —la primera por utilizar ceniza muy reciente—, pueden surgir problemas de transporte y vertido de camiones-mezcladores (que en general no son adecuados), así como de demanda de agua, la cual a veces se presenta en dos etapas. Se suele tratar de hormigones con material conglomerante con contenidos de ceniza superiores al 50 % y dosificaciones totales altas —del orden de 400 kg/m³— difícilmente trabajables y muy cohesivos. En tales casos conviene rebajar algo la relación ceniza/cemento y elevar algo la relación agua/cemento + ceniza para reducir la cohesividad.

Es curioso que en alguno de estos casos se utilizaron cenizas con grandes contenidos de carbón y residuos sobre tamiz de 45 µm superiores a los admitidos por las normas.

En todo caso, al hormigón con alto contenido de cenizas hay que considerarlo como un material nuevo “per se”, al margen del concepto de ahorro de cemento por sustitución de éste por ceniza.

Es difícil evaluar y comparar la acción global de las cenizas en los hormigones ya que, al añadir las, se reajustan las proporciones de agua, cemento y áridos, cambiando las condiciones, lo cual hace muy inciertos los resultados de las comparaciones. En estudios de sustitución de cemento, árido grueso o arena fina para ver la influencia de las sustituciones en la trabajabilidad y en la resistencia de hormigones de distintas relaciones a/c, se ha podido ver que el efecto de la sustitución parcial de cemento o de árido por ceniza depende inversamente de la relación a/c y de la temperatura de curado.

Como colofón común a la utilización de las cenizas en fábricas de cemento para ahorrar clínker, o en obras para ahorrar cemento, siempre con la mira de economizar energía y concretamente combustible derivado del petróleo, es conveniente indicar que se corre el riesgo de caer en exageraciones o extrapolaciones que pueden llegar a ser conflictivas y peligrosas.

Una la constituye el riesgo de llegar a considerar —y a definir— como “cemento” algo distinto a lo que tradicionalmente se produce en las fábricas del sector, con todas sus implicaciones e inconvenientes. Otra es el peligro de extralimitaciones en la sustitución de cemento por ceniza en el hormigón.

Según una información del CEMBUREAU, que hace referencia a la Sección “Current Practice Sheets”, del número de Octubre de 1980 de la Revista CONCRETE, en dicha Sección se dan consejos para la utilización de cenizas en hormigón. Estos se condensan en un cuadro titulado “Factores de corrección de la mezcla”, cuyos datos, presentados por CEMBUREAU en forma de gráfico, indican las variaciones de los contenidos de cemento, cenizas y agua, según los porcentajes de adición de cenizas para hormigones de resistencias a 28 días comparables. El gráfico muestra que, a partir de una dosificación de cemento de 300 kg/m³, y por adición de cenizas hasta un 50 % del contenido total de cenizas más cemento, se puede llegar a reducir el contenido inicial de cemento a un 57 %, es decir, se puede llegar a ahorrar nada menos que un 43 % de cemento, manteniendo la resistencia por reducción de la cantidad de agua, que es uno de los principales papeles de las cenizas.

Esto puede ser así, evidentemente; pero, ¿con todas las cenizas?, ¿con cualquier ceniza? Ese es el problema: la utilización de cenizas —como la de escorias siderúrgicas o de puzolanas naturales— implica problemas de calidad, costo, transportes, suministros, almacenamientos, etc. Si en un momento dado se produce escasez de cenizas de buena calidad, se corre el riesgo de suministrarlas malas por afán de mantener su mercado. Y cabe preguntarse quién controla entonces la situación, o quién vigila la calidad y sus variaciones para evitar que, en un caso dado, la generalización del gráfico expuesto, valedero tal vez para una o unas cenizas determinadas pero no para todas, pueda dar lugar a contratiempos. El fabricante de cemento en su fábrica lleva a cabo un riguroso control de recepción de las cenizas que utiliza; la cuestión está en si se puede afirmar lo mismo de las cenizas recibidas y empleadas en las obras. En el primer caso el fabricante garantiza —se responsabiliza de— el cemento que produce y suministra, el cual debe responder a una serie de requisitos; en el segundo caso habría que determinar quién se responsabiliza de una mezcla, no ya sólo de cemento y ceniza, indefinida en su conjunto y/o en alguna de sus partes, sino que abarca a todos los componentes del hormigón.

16. OTROS EMPLEOS DE LAS CENIZAS

Las cenizas se han empleado para la fabricación de hormigones de yeso, de buena resistencia mecánica y al agua, esta última conseguida o mejorada con la ayuda de aditivos

hidrófobos, aun en detrimento parcial de la resistencia mecánica, sobre todo en estado seco.

La ceniza utilizada, obtenida por combustión de un carbón con mucho azufre en presencia de caliza y dolomía para controlar la emisión del mismo, es de composición atípica:

C \bar{S}	72,5 %
S	11,6 %
A	4,7 %
F	1,8 %
C	1,8 %

Se probó en varias mezclas ternarias y cuaternarias con yeso, escoria granulada, puzolana, cal y cemento.

Aparte de esto, las cenizas, como las escorias siderúrgicas, se pueden emplear en la estabilización de suelos y como material conglomerante para bases y sub-bases de firmes.

En este aspecto, la utilización de cenizas volantes de centrales termoeléctricas para la estabilización de suelos y, en particular para la realización de bases y sub-bases de firmes, es en general más moderna que la utilización de cemento o de cales con el mismo fin.

Las cenizas volantes se han utilizado en combinación con distintos tipos de ligantes, unos derivados del petróleo (asfaltos), de la hulla (alquitranes y breas), y otros de naturaleza conglomerante aérea (cales vivas) o hidráulica (cales hidráulicas y cemento portland). A veces estos ligantes y/o conglomerantes se utilizan en mezcla.

Experiencias de tipo técnico-económico comparativo, llevadas a cabo en tramos cortos de firmes con distintos tipos de estabilización hecha con arena monogranular y diferentes ligantes, realizadas en Dinamarca en 1981, han dado ciertos resultados, de los cuales se puede deducir lo siguiente:

En el aspecto económico, que las soluciones de estabilización a base de cemento portland, con o sin cenizas volantes y otros conglomerantes, fueron las más baratas; y, entre ellas, la que más, la que utiliza una mezcla de cemento y cenizas volantes. Por el contrario, las soluciones a base de ligantes asfálticos o bituminosos fueron las más caras.

En el aspecto técnico, las soluciones basadas en el uso del asfalto, si bien dieron una buena capacidad portante, exigen ser aplicadas sobre una sub-base estabilizada, por lo cual se prestan menos a la estabilización por sí mismas. Y las soluciones consistentes en la estabilización con alquitrán proporcionaron materiales deformables con capacidad portante muy escasa.

Por el contrario, las estabilizaciones con cemento sólo, o con cemento y ceniza, dieron una buena capacidad portante para una misma resistencia, incluso inicialmente baja, sin indicios de deformación o de ruptura bajo la acción del tráfico. La diferencia es que en el primer caso se produjeron fisuras por retracción a intervalos de 20 a 30 m, prácticamente sin manifestación en la capa de rodadura, mientras que en el segundo caso no se observaron fisuras en absoluto. La adición de cal viva al cemento y a la ceniza retrasa el desarrollo de la resistencia y de la capacidad portante y, en consecuencia, la apertura al tráfico o la utilización del firme, por lo cual no presenta ninguna ventaja, ni siquiera económica, frente a la solución cemento-ceniza volante, que resulta ser por todo ello la más aceptable.

Dentro de esta perspectiva, la conclusión respecto del cemento que se considera técnica y económicamente más idóneo para la estabilización, es la de que dicho cemento debe ser del tipo PA —portland con adiciones activas (cenizas volantes) hasta un 20 por ciento—, o del tipo PUZ-II (puzolánico con cenizas volantes hasta un 30-40 por ciento como máximo), ambos según las normas españolas (RC-75), o un cemento del tipo CPJ —portland compuesto (con cenizas volantes hasta un 35 por ciento)—, según las normas francesas (NF P 15 301, 1978) o similar.

17. PRESENTE Y FUTURO

Una encuesta hecha en 1978 entre los países miembros del CEMBUREAU europeo, acerca de la utilización de cenizas con cemento u hormigón, puso de relieve el hecho de que el porcentaje de utilización de las cenizas producidas, para cemento y/o para hormigón, oscila entre el 0 y el 90.

Esta variabilidad tan amplia puede ser debida al hecho de haberse considerado por parte de algunos países como cenizas, todas las recogidas por medios tanto mecánicos (ciclones y filtros) como eléctricos (precipitadores electrostáticos), mientras que tal vez por parte de otros sólo se han considerado como tales estas últimas. En el primer caso se trataría de un gran volumen con escaso porcentaje de aprovechamiento, mientras que en el segundo se trataría de lo contrario. En realidad, lo correcto es esto último. Por lo tanto, lo mismo el grado de aprovechamiento individual que el promedio queda muy por debajo del 90 %, y muy probablemente entre el 30 y el 40 por ciento.

No obstante, para 1985 se prevé un incremento del consumo de cenizas útiles, en algunos países miembros del CEMBUREAU, de modo que el volumen de las empleadas puede alcanzar el 20 % del consumo de cemento. La promoción en general, salvo en alguno de estos países, se lleva a cabo por parte de las industrias del cemento, y no por parte de las centrales termoeléctricas. Se recomienda que, a fin de que no merme la capacidad hidráulica o puzolánica de las cenizas, el transporte, manipulación y almacenamiento de las mismas se efectúen siempre en seco, como si se tratara del propio cemento.

El uso creciente de las cenizas en los cementos se puede considerar como una posibilidad interesante o como una amenaza para los sectores industriales cementeros, por parte de éstos. Está claro que sería lo primero, si las cenizas se empleasen en fábrica; y lo segundo, si se emplearan en centrales hormigoneras y, lo que es peor, en obras.

Un punto de vista objetivo y ponderado al respecto, emitido en un caso particular, pero con validez general, es el de que, si no fuera por la necesidad de ahorrar energía, algunas industrias cementeras no serían muy entusiastas del empleo de las cenizas. Pero la situación de disponibilidad, suministro y precio de los combustibles, y la perspectiva de posibles limitaciones en la explotación de canteras y extracción de materias primas por consideraciones ecológico-ambientales y de conservación de los recursos, hacen inevitable que, más pronto o más tarde, haya que recurrir a los cementos con cenizas, y utilizar cada vez menos el cemento portland puro.

Se podría concluir que la industria del cemento, en general, no es favorable al incremento del uso de las cenizas en el hormigón, y sí lo es a la utilización de las mismas como adición al cemento. Y esto por razones obvias, situaciones y circunstancias específicas aparte.

Abona estas ideas el argumento de excepción y de última hora aportado por un país como Dinamarca, tradicionalmente reacio a la utilización —y normalización— de cementos

con adiciones (salvo los de albañilería), el cual ha sido hecho público en la revista danesa "Beton-Teknik". Según dicho argumento, la firma Aalborg Portland decidió producir y comercializar un cemento con cenizas, a partir de la primavera de 1981, en vista del uso ordinario y creciente de cenizas en el hormigón:

- i) como aportadoras de mejoras;
- ii) como reductoras de la cantidad de cemento y, en consecuencia, de abaratamiento del hormigón, y ante la necesidad de racionalizar en todo caso el empleo de las cenizas.

El contenido de cenizas en dicho cemento se prevé de un 35 % como máximo, por lo que resulta análogo a los cementos CPJ franceses, a los PUZ-II españoles, y a los II-Z previstos y tal vez en un futuro sancionados por las normas europeas CEN (Comité Europeo de Normalización).

Las cenizas utilizables deben cumplir las condiciones exigidas para las añadidas directamente al hormigón, y no rebasar el contenido máximo admisible de 5 % de carbón. Por otra parte, los cementos con cenizas deben tener en general una finura mayor que los portland —superior a los 4.000 cm²/g BLAINE—, a fin de que den a todas las edades prácticamente las mismas resistencias que aquéllos, incluidos los de endurecimiento rápido.

Los Estados Unidos, otro de los países poco proclives a la utilización de adiciones incluso activas en los cementos, ha prestado atención, a través de la EPA (Environment Protection Agency) en sus Guidelines for Federal Procurement of Fly-Ash in Cement and Concrete, al empleo de las cenizas, considerando su abundancia, su disponibilidad en condiciones económicas interesantes, sus posibilidades de empleo comprobadas y su potencial utilización masiva por parte de los Poderes Públicos.

Se precisa que el cemento portland con cenizas puede sustituir a los cementos de los tipos I, II, IV y V ASTM, siempre que el contenido de ceniza no rebase el 20-25 %. Se llama aquí la atención sobre el hecho de que desde 1975 las Normas Españolas para cemento incluyen un cemento PA —portland con adiciones activas— que puede contener hasta un 20 % de las mismas, entre las que se incluyen, además de las cenizas, las escorias siderúrgicas y las puzolanas naturales.

A través de las mencionadas Directrices se señala que con un 20 % de cenizas contenido en el cemento portland se logra un ahorro de energía del 15 % y una reducción del costo de producción del 5 %, precisándose además que ello no debería implicar necesariamente una diferencia de precio en relación con los cementos portland sin cenizas.

Se indica asimismo que las cenizas se pueden añadir también directamente al hormigón, de forma tal que 1 parte de cemento puede ser sustituida por 1,25 a 1,50 partes de ceniza (en peso). Pese a la moderación "aparente" de esta limitación —otros criterios europeos señalan proporciones de sustitución de 1:1,3, 1:2,3 y hasta 1:3—, la adición directa de cenizas en la hormigonera puede causar dificultades y dar lugar a problemas en algún caso, por motivos de falta o insuficiencia de control y de regularidad y uniformidad de las adiciones, y de falta de homogeneidad de las mezclas.

Por otro lado, aun cuando se pudiera invocar una aún mayor economía global por el hecho de utilizar las cenizas volantes en obra e incluso en central hormigonera, en lugar de añadirlas al clínker en fábrica de cemento, las razones expuestas aconsejan esta solución como preferible a la del empleo de las cenizas en obra. Esto no implica que las cenizas hayan de ser molidas siempre junto con el clínker; pueden serlo, o pueden ser

molidas aparte y mezcladas homogéneamente después, o la mezcla y homogeneización puede efectuarse con el cemento y la ceniza sin moler, pero siempre en fábrica y bajo el control necesario de los materiales mezclados, de las proporciones y de la mezcla y homogeneización en sí.

Sin embargo, atendiendo a la posibilidad de añadir las cenizas directamente en obra, existe un Proyecto que pretende someter en USA todo el conjunto de normas y reglamentos de los Estados y del Gobierno Federal para tratar de suprimir toda discriminación de los cementos y de los hormigones con cenizas respecto de los tradicionales que no las contienen, considerando a todos ellos en plano de igualdad en todas las adjudicaciones de obras públicas.

Más todavía: el citado Proyecto recomienda a los Servicios correspondientes dar preferencia a las ofertas que incluyan el empleo de cenizas volantes, con tal de que el precio sea "razonable", entendiéndose por tal aquél que no exceda en más de un 5 % del de la solución tradicional sin utilización de cenizas.

Por supuesto, que en el Proyecto se tiene en cuenta la necesidad de retrasar, bien las edades de los ensayos —sin variar las exigencias de resistencia—, o bien la entrada en servicio de las estructuras —en los casos de firmes de hormigón y pistas de aterrizaje—, lo cual equivale a reconocer de antemano un endurecimiento más lento y un desarrollo menos rápido de las resistencias a corto plazo en el caso de los cementos y hormigones con cenizas y, en general, con cualquier adición que, aunque activa, no manifiesta su actividad en las primeras edades, sino a plazo más o menos diferido. Por otra parte, este es un hecho innegable que por lo común nadie niega.

En contraste con lo anterior, Japón, con una producción muy elevada de cemento y una previsión de 2,5 millones de toneladas de cenizas para 1985, no produjo en 1980 más que 1,65 millones de toneladas de cemento con cenizas. A las destinadas a ser utilizadas en el hormigón se les exige el cumplimiento de requisitos físicos y químicos análogos a los expresados en otro lugar. En general, las cenizas de lignitos no se utilizan o se utilizan muy poco. No faltan, sin embargo, estudios, experiencias y publicaciones japoneses relativas al tema.

18. FINAL

Por oposición a las centrales eléctricas termonucleares —o como complemento de ellas— las centrales eléctricas térmicas de carbón sobrevivirán y proliferarán, con lo cual las cenizas abundarán y so pena de consumo, se acumularán con todas las consecuencias.

Es pues previsible un incremento notable de su empleo. En tal sentido, en lo que al cemento y al hormigón concierne, deberán ser tenidas en cuenta.

Con ser todo esto algo, es muy poco en relación con lo que se debería saber acerca del papel de las cenizas en la hidratación del portland, haciéndose necesario el establecimiento de métodos de ensayo y control y de especificaciones, así como de alguna guía para usuarios, pues se suele prestar poca atención, en general, a las limitaciones relativas a la composición, a las características físicas y a la uniformidad de las cenizas, en relación con su utilización. No se olvide que ésta ha sido muy anterior al conocimiento del material y a la existencia de normas y especificaciones para su control, y que se ha producido un aumento muy rápido de su consumo en los últimos tiempos.

En este sentido hay que tener en cuenta que las cenizas deben poder ser utilizadas con

las técnicas usuales del hormigón, para lo cual es preciso especificar lo necesario, si bien las especificaciones deberían variarse con el uso y las aplicaciones de las cenizas.

De vital importancia es el autocontrol de los productores y el de conformidad a la recepción por el usuario, por lo que ambos controles se deben basar en métodos rápidos y sencillos de aplicación que permitan determinar un número reducido, pero suficiente, de parámetros definitorios y decisorios.

Para el control de la producción servirían a tales efectos las determinaciones de la pérdida al fuego (y/o el contenido de carbón) y del residuo sobre tamiz de 45 μm , mientras que para el de recepción servirían las determinaciones de los contenidos de sulfuros y de humedad, y de la densidad real, los cuales son menos importantes para el productor.

El total de exigencias ha llegado a establecerse así y en cualquier caso:

PF	<	6,5-7 %
M	<	4 %
\bar{S}	<	2,5 %
H	<	0,5 %
Finura	<	12,4 % (tamiz 45 μm)
Exigencia de agua	<	95 % (del control: cemento solo)
Densidad	<	2.000 kg/m^3
Color	<	7 (de un criterio y escala convencionales)

El mayor contenido de pérdida al fuego (y/o de carbón) da lugar a una reducción de las partes activas de la ceniza, a un aumento de la exigencia de agua por la mayor superficie específica (porosidad) de las partículas grandes de carbón, a una influencia negativa de éste sobre los aditivos del hormigón (y en particular sobre los inclusores de aire) y a un retraso del endurecimiento con unas resistencias finales menores.

La humedad —contenido de agua— puede crear dificultades en la descarga de los silos (apelmazamiento y abovedado), así como atascos en los filtros de captación.

El contenido de sulfatos de las cenizas puede afectar al fraguado y al cumplimiento de las limitaciones para \bar{S} en las normas de cemento, cuando las cenizas van incorporadas a éste. Interesan más a todos los efectos los sulfatos solubles, por su más rápida reacción con el C_3A . La determinación y control del contenido de sulfatos solubles de las cenizas se ha llegado a hacer por conductimetría, en relación con patrones y calibrado.

La densidad real, interesa —así como, por otra parte y por otros motivos la densidad aparente o “peso del litro”—, por las proporciones de mezcla con cemento. Se puede determinar con el clásico volumenómetro LE CHATELIER.

El color afecta a la estética del hormigón y sube tanto más cuanto mayor es la pérdida al fuego y menor la finura, ya que es producido por las partículas negras de carbón —sobre todo coque quemado—, las cuales se acumulan en las fracciones gruesas, superiores a 45 μm .

Por otra parte, el uso racional y controlado de las cenizas permite, en circunstancias, romper con la limitación de su empleo por rebajar las resistencias a corto plazo, pues cuando se ha intentado alcanzar el objetivo de lograr, empleando cemento con ceniza, la

misma resistencia a 24 horas que con cemento solo (en hormigones de $R_{28} = 30-45 \text{ N/mm}^2$), ello se ha podido conseguir.

Del mismo modo se han logrado resistencias de 40 N/mm^2 a 48 horas y de 100 N/mm^2 a 28 días.

Hay que señalar a este respecto que la importancia del curado en los hormigones con cenizas es muy grande, aparte de que, como en el caso general, es mucho mejor el curado en húmedo o en agua que al aire seco.

BIBLIOGRAFIA

- INTERNATIONAL SYMPOSIUM: Department of Civil Engineering, Leeds University, England. Abril, 1982:
- P. F. G. BANFILL: "An Experimental Study of the Effect of PFA on the Rheology of Fresh Concrete and Cement Paste".
 - A. D. BLACKIE: "The Influence of PFA on the Properties of Structural Concrete".
 - H. W. BRADBURY: "The Use of Fly Ash in Pre-Blended Cement".
 - J. J. BROOKS, P. J. WAINWRIGHT y J. B. CRIPWELL: "Time-Dependent Properties of Concrete Containing Pulverized Fuel Ash and a Super Plasticizer".
 - J. H. BROWN: "The Strength and Workability of Concrete with PFA Substitution".
 - F. G. BUTTLER, M. H. DECTER y G. R. SMITH: "Studies of the Relationship Between Desiccation, Carbonation and Compressive Strength for Systems Containing Portland Cement and PFA".
 - F. G. BUTTLER y E. J. WALKER: "The Rate and Extent of Reaction Between Calcium Hydroxide and Pulverized Fuel".
 - J. G. CABRERA y C. J. HOPKINS: "The Effects of PFA on the Rheology of Cement Pastes".
 - J. G. CABRERA y C. PLOWMAN: "Hydration Mechanisms, Mineralogy and Morphology of the C_3A -PFA System".
 - B. G. T. COPELAND: "PFA Concrete for Hydraulic Tunnels and Shafts, Dinorwic Pumped Storage Scheme Case History".
 - J. A. DALZIEL: "The Behaviour of Pulverized Fuel Ash with Different Portland Cements".
 - M. R. H. DUNSTAN: "The Use of High Fly Ash Content Concrete in Roads".
 - C. ELLIS: "The Application of the Two-Point Workability Test and British Standard Tests to OPC/PFA Concretes".
 - Z. B. ENTIN, T. V. KUZNETSOVA, A. M. DMITRIEV y G. G. LEPESHENKOVA: "Properties of Fly Ash and Hydration of Ash Particles in Hardening Concrete".
 - J. H. FABER y H. T. STIRLING: "Coal and Ash Characteristics that Affect the Use of Pozzolans in the United".
 - P. M. GIFFORD y M. A. WARD: "Results of Laboratory Tests on Lean Mass Concrete Utilizing PFA to a High Level of Cement Replacement".
 - Y. IVANOV y S. ZACHARIEVA: "Influence of Fly Ash on the Rheology of Fresh Concrete".
 - R. KOVACS y G. VAMOS: "Investigation of the Physical and Chemical Properties of Hungarian Fly Ashes".
 - J. H. L. MUNDAY, L. T. ONG, L. B. WONG y R. K. DHIR: "Load-Independent Movements in OPC/PFA Concrete".
 - S. NAGATAKI y E. SAKAI: "Effective Use of Fly Ash in Precast Concrete Produced by Autoclave Curing".
 - L. D. NICOLESCU: "Some Properties of Romanian Fly Ashes".
 - D. B. OATES y J. H. P. BUCKINGHAM: "Properties of Fly Ash Concrete".
 - L. T. ONG, J. G. L. MUNDAY y R. K. DHIR: "Mix Design for OPC/PFA Concrete".
 - P. L. OWENS y M. J. WADDICOR: "Techniques for the Assessment and Production Control of Pulverized Fuel Ash for Use in Concrete".
 - E. RAASK: "Pulverized Fuel Ash Constituents and Surface Characteristics in Concrete Applications".

- D. S. SHEN e Y. J. ZHANG: "The use of Ground Fly Ash for the Production of Cement or Concrete".
- R. N. SWAMY: "Structural Properties of Fly Ash Concrete".
- I. TEOREANU y L. D. NICOLESCU: "The Properties of Power Station Fly Ash Concrete".
- H. UCHIKAWA, S. UCHIDA y K. OGAWA: "Influence of the Properties of Fly Ash on the Fluidity and Structure of Fly Ash Cement Paste".
- J. T. WILLIAMS y P. L. OWENS: "The Implications of a Selected Grade of United Kingdom Pulverized Fuel Ash on the Engineering Design and Use in Structural Concrete".
- G. R. WOOLLEY: "Construction of Structures at Drax Power Station Using PFA Concrete".
- R. L. YAN y J. E. COOK: "Time-Dependent Deformation of High Strength Fly Ash Concrete".
- YUAN RUN-ZHANG, ZHU JIE-AN y ZHANG LI-YUN: "Composition and Structure of Fly Ashes and Their Pozzolanic Reactivity".
- L. G. CHERNAYA: "Production of Gypsum Concrete with PFA Ingredients".

-
- JUSTESEN, Chr. F.: "Route expérimentale stabilisée au sable monogranulaire avec des cendres volantes". CEMBUREAU Roads News Letter 6, Agosto 1981.
 - J. T. DIKEOU: "Fly-ash increases resistance of concrete to sulfate attack". BUREAU OF RECLAMATION, US Dept. of Interior Research Report No. 23, 1970 revisado 1975.
 - J. CALLEJA: "Puzolanas". Curso sobre Adiciones y Materiales Puzolánicos para Cementos. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Medellín (Colombia), Octubre 1977.
 - J. CALLEJA: "Cementos Puzolánicos". Curso sobre Adiciones y Materiales Puzolánicos para Cementos. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Medellín (Colombia), Octubre 1977.
 - J. CALLEJA: "Los Cementos Puzolánicos en la Prefabricación". Curso sobre Adiciones y Materiales Puzolánicos para Cementos. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Medellín (Colombia), Octubre 1977.
 - J. CALLEJA: "En torno a las cenizas volantes en los cementos y en los hormigones, a la luz de un trabajo presentado en el 7.º Congreso Internacional de la Química de los Cementos". Materiales de Construcción (IETCC), en prensa 1982. Cemento y Hormigón, en prensa, 1982.
 - Report of the Ad-Hoc Committee on Fly-Ash: CEMBUREAU Circular Letter-64, Anexo 3, Paris, 12 Octubre 1979.
 - Miembro danés del CEMBUREAU "Introducción del Cemento Portland con Cenizas en Dinamarca". CEMBUREAU Technical Newsletter No. 5, Paris, 22 de Julio de 1981.
 - "Emploi des Cendres Volantes aux USA". CEMBUREAU Lettre Circulaire No. 21, Paris, 16 Abril 1980.
 - "La Responsabilité en Matière de Processus d'Hydratation. Les ajouts de matériaux secondaires, un sujet de préoccupation pour l'industrie cimentière". CEMBUREAU REVIEW of Current Activity, Paris Julio-Diciembre 1980.