

619 - 17

cenizas de combustibles españoles propiedades aglomerantes

PABLO GARCIA DE PAREDES Y GAIBROIS

Ldo. en Ciencias Químicas
Jefe de la Sección de Estudios Especiales sobre Aglomerantes

El deseo que anima a la Dirección de este Instituto en orden a la máxima utilización de cuantos subproductos ofrezca la industria española y posean propiedades que permitan emplearlos en la construcción, con el consiguiente abaratamiento de la misma, ha sido la idea rectora de este primer o preliminar estudio de las cenizas que algunos combustibles españoles dejan al ser utilizados en las centrales térmicas.

Además de las propiedades que como aglomerante o adición activa a los aglomerantes normalizados posean las cenizas (volantes o de parrilla), el mejor conocimiento de sus caracteres técnicos presenta el interés de poder llegar a identificar su presencia en los aglomerantes cuando su adición se haya realizado fraudulentamente; ya que, si bien este extremo no podrá tener lugar en las fábricas, cabe, en una situación deficitaria, que la realicen manos anónimas de intermediarios.

Esta nota, que sólo amplía algunos extremos de la monografía n.º 175 publicada años hace por el Dr. D. Demetrio Gaspar Tebar, tiene un carácter de primera aproximación, pues el limitado número de casos examinados no permite generalizar los resultados sin una más exhaustiva experimentación.

Los productos sólidos que la combustión de los carbones proporciona, pueden ser, como es sabido, denominados «cenizas volantes», si el combustible se quema después de pulverizado, o «de parrilla», en caso de no haber sufrido la molturación citada. Naturalmente, aun tratándose del mismo combustible, el material es diferente, porque

ni las temperaturas a que se encontró sometido, ni las condiciones de enfriamiento, ni el ambiente en el cual se realizó la combustión, son similares.

El material designado con el número 145 es una ceniza de parrilla; los demás son cenizas volantes.

Composición química

La Sociedad Norteamericana de Ensayos (A. S. T. M.), en su especificación C 350 — 54 T, fija los siguientes límites para la aceptación de estos materiales como aglomerantes o adición a los mismos:

SiO ₂	40,0 % mínimo
MgO	3,0 % máximo
SO ₃	3,0 % máximo
Humedad	3,0 % máximo
Pérdida de peso al calcinar	12,0 % máximo
Alcalis (Na ₂ O)	1,5 % máximo

El contenido de álcalis sólo se tendrá en cuenta a petición del usuario.

En cuanto a la cantidad de carbón sin quemar, Peters (Betonstein Ztg 1957, H.1, S.27) recomienda mantenerse entre el 3 y el 5 %.

En el cuadro n.º 1 se exponen los resultados de los análisis del material estudiado; como puede comprobarse fácilmente, las cantidades preponderantes corresponden a la sílice, la alúmina y el óxido férrico. Existen diferencias notables en la cuantía de la fracción soluble en ácido clorhídrico y carbonato sódico; se ha destacado esta

13

porción, puesto que para muchos autores precisamente tienen interés, ya que asimilan el carácter aglomerante de las cenizas solamente a los elementos solubles.

Como no existe un método que permita fijar, de un modo categórico, el valor de las cenizas como aglomerantes hidráulicos, se ha adoptado, en esta nota, con ese carácter la capacidad de fijación de cal por las mismas, siguiéndose un procedimiento, el cual, si bien es harto lento, nos permite investigar algo acerca de los compuestos que se forman en la reacción de fijación del calcio.

Para ello se coloca una cantidad de la ceniza que se examina en contacto con agua de cal saturada, y, a intervalos regulares de tiempo, se mide la concentración del calcio (expresada como CaO) en la fase líquida del sistema. Para que los datos puedan ser comparables se ha mantenido fija la temperatura, adoptándose la de 37°C, porque, sin ser tan baja que la reacción transcurriera con extremada lentitud, no influya en el sentido de favorecer la formación de compuestos diferentes a los que se crearan cuando la reacción tiene lugar en el seno de un mortero o de un hormigón en las condiciones más generales de su utilización.

En todas las manipulaciones se evitó la acción del carbónico atmosférico mediante el empleo de una atmósfera de nitrógeno exento de CO₂. Al mismo tiempo que se realizan las tomas de líquido y su reposición por nuevas cantidades de agua de cal saturada, se extrajeron algunos miligramos de la fase sólida y se les examinó con el microscopio dispersos en agua de cal. Este examen, al que se acompañó con la obtención de microfotografías, permite en una primera aproximación, conocer qué compuestos son los que tienen nacimiento durante la reacción. Tal conocimiento se puede traducir en la posibilidad de enjuiciar acerca de cuáles son los componentes más estimables en las cenizas en orden a su valoración como aglomerantes.

Decimos que de las preparaciones microscópicas obtenemos, «en primera aproximación», datos sobre los nuevos compuestos, porque sólo mediante el conocimiento de la estructura cristalina de éstos, obtenido con el examen de los espectros de rayos X,

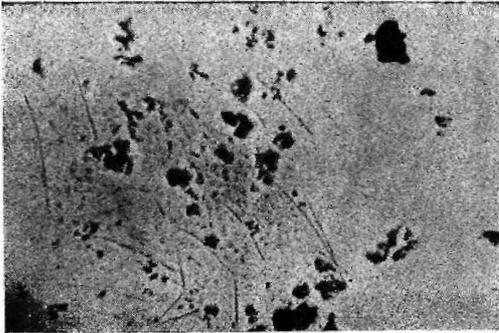
se puede alcanzar una mayor certidumbre. En fecha próxima esperamos completar de este modo las observaciones realizadas.

Los resultados logrados mediante el análisis de la fase líquida del sistema cenizas-agua de cal, se exponen en los cuadros n.ºs 2 al 7; en ellos puede apreciarse la diferente marcha del fenómeno de una a otras cenizas. En realidad la diferencia es más de índole cuantitativa, ya que las variaciones de la velocidad de reacción siguen una curva similar. A pesar de que la relación sólido-líquido es en este sistema distinta de la que existe en los morteros y hormigones, la circunstancia de que tanto en éstos como en el sistema estudiado la fase líquida sea agua saturada de hidróxido cálcico, permite suponer que en ambos casos las reacciones discurren de forma similar.

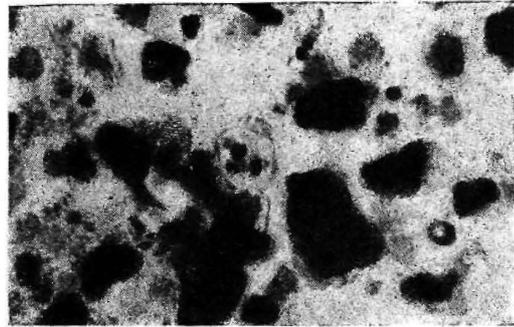
La colección de fotos que se inserta, escogidas entre varios centenares de negativos, permiten apreciar la presencia de tres tipos diferentes de formaciones: Agujas que a veces forman «erizos» alrededor de los granos, placas hexagonales y masas amorfas o, mejor, informes. El examen de los compuestos cristalinos con luz polarizada convergente, la evolución de las placas hexagonales a formas octaédricas y la comparación de las fotos obtenidas con las publicadas por otros investigadores que operaron con especies puras, nos permite asegurar que las agujas están formadas por el sulfoaluminato engendrado a expensas del sulfato en que se convierte el azufre de las cenizas. Las placas hexagonales son, con bastante seguridad, cristales de aluminato tricálcico en su forma metaestable y, quizás, mezclas formadas por aluminatos cálcicos y ferro-aluminatos.

Los silicatos no aparecen visiblemente, quizás porque sus índices de refracción los hagan no visibles, pero es muy posible que constituyan las formaciones amorfas que se han indicado.

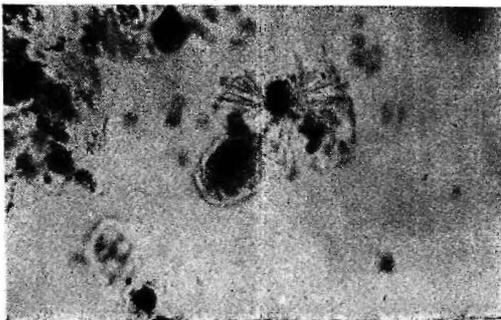
El cuadro n.º 8 contiene la granulometría de las cenizas tal como se recibieron. Los datos se obtuvieron por tamizado hasta las 50 micras, y el material que pasó a través del tamiz de esa luz se sometió a la levigación con aire en el fluorómetro de Pearson, con lo cual se conoció el valor de las fracciones comprendidas entre 45 y 0 micras.



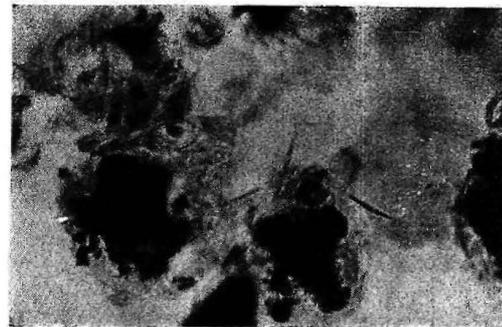
Ceniza 148 + agua de cal 8 días



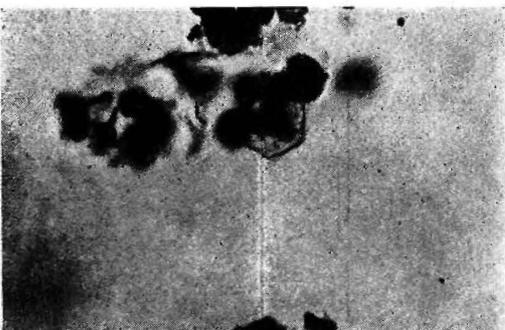
Ceniza 148 + agua de cal 31 días



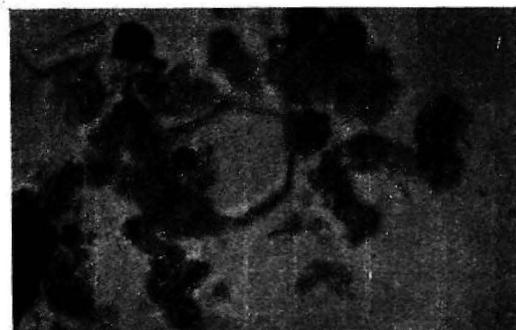
Ceniza 148 + agua de cal 60 días



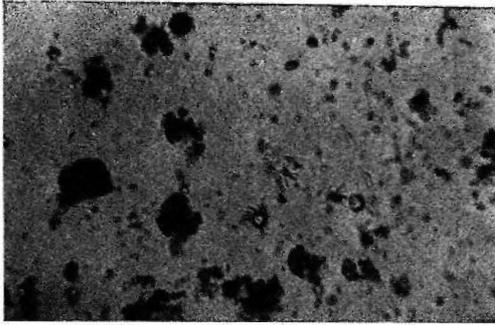
Ceniza 148 + agua de cal 120 días



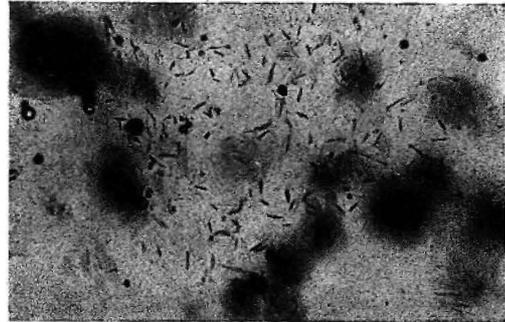
Ceniza 154 + agua de cal 28 días



Ceniza 154 + agua de cal 60 días



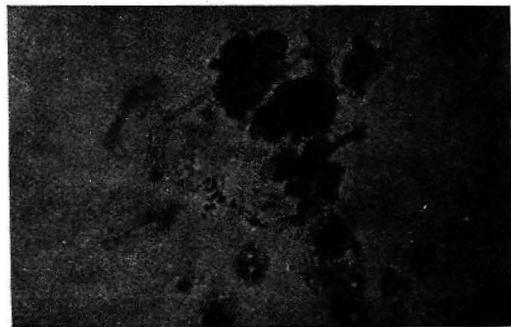
Ceniza 150 + agua de cal 7 días



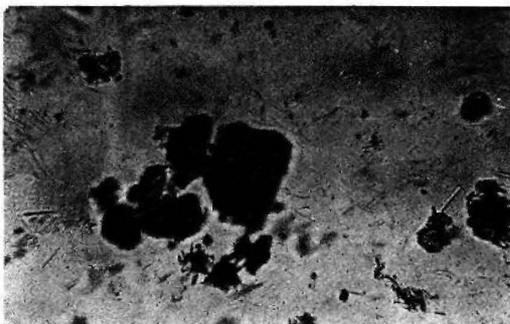
Ceniza 153 + agua de cal 8 días



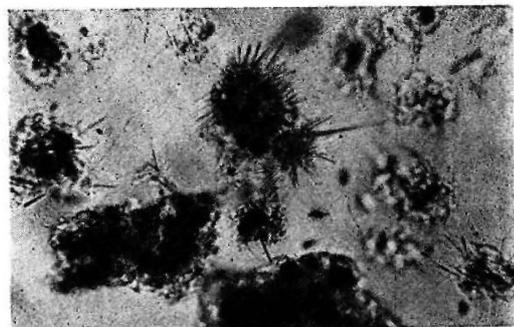
Ceniza 153 + agua de cal 28 días



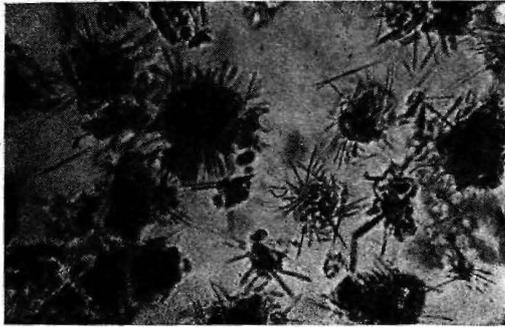
Ceniza 153 + agua de cal 60 días



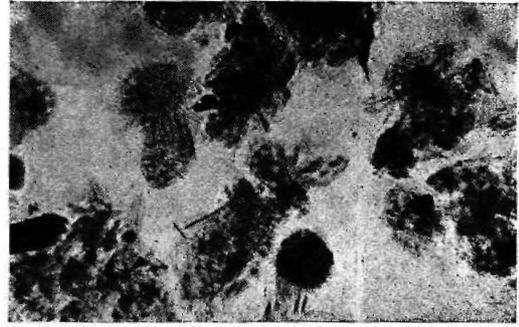
Ceniza 145 + agua de cal 8 días



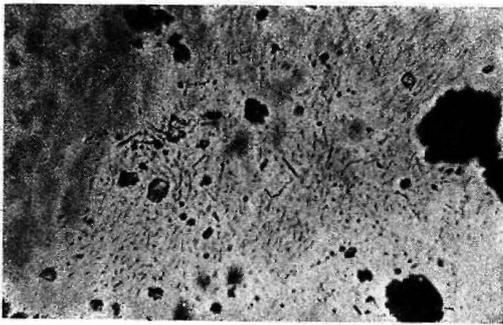
Ceniza 145 + agua de cal 90 días



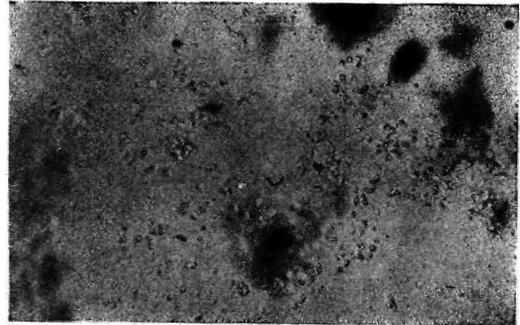
Ceniza 145 + agua de cal 150 días



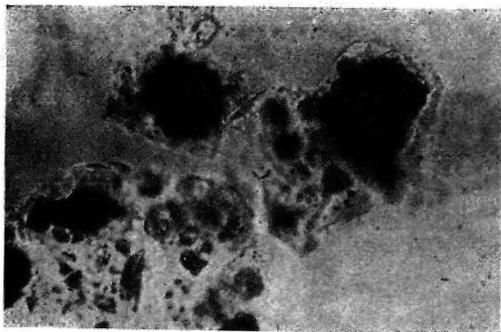
Ceniza 145 + agua de cal 180 días



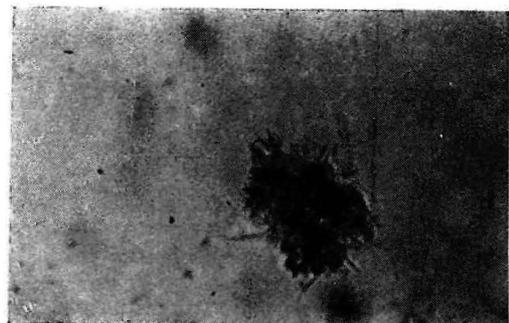
Ceniza 146-I + agua de cal 8 días



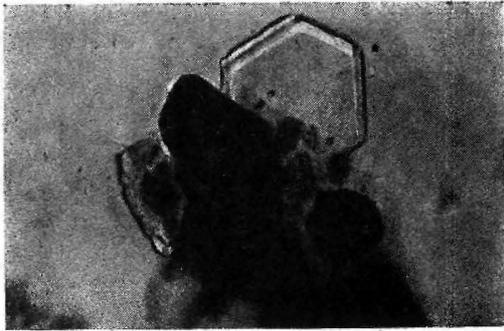
Ceniza 146-I + agua de cal 28 días



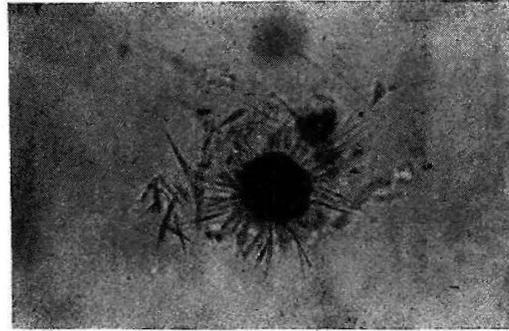
Ceniza 146-I + agua de cal 150 días



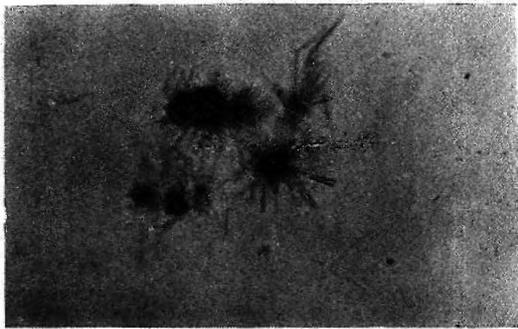
Ceniza 146-I + agua de cal 90 días



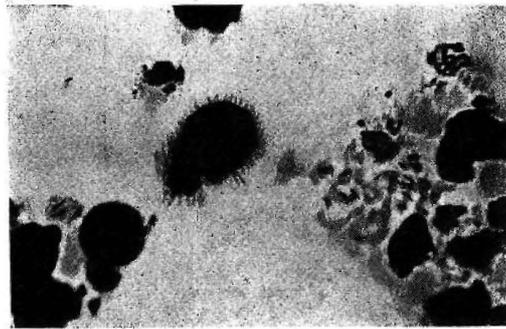
Ceniza 146-II + agua de cal 28 días



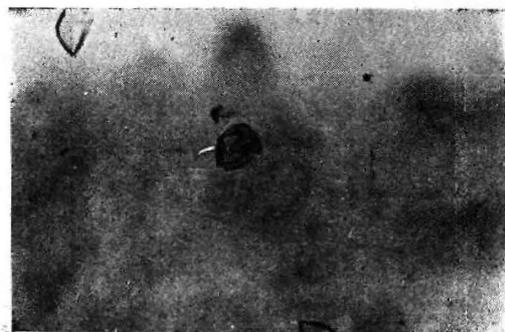
Ceniza 146-I + agua de cal 180 días



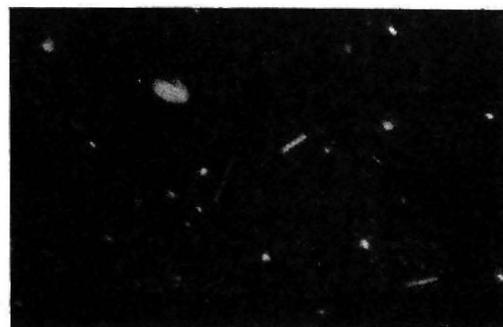
Ceniza 146-I + agua de cal 240 días



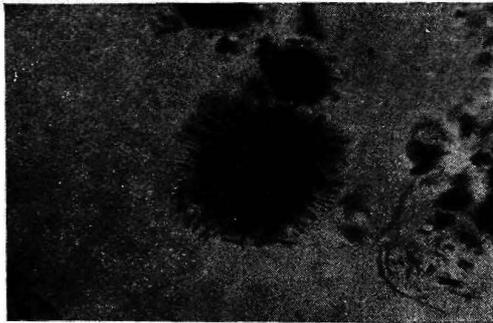
Ceniza 146-II + agua de cal 28 días



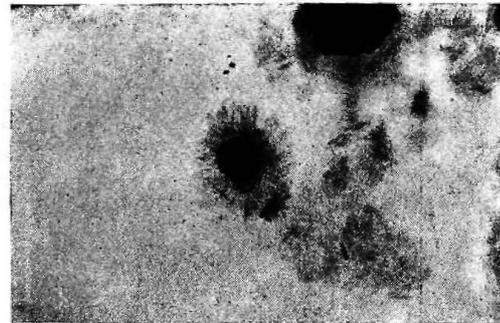
Ceniza 146-II + agua de cal 90 días



Ceniza 146-II + agua de cal 150 días



Ceniza 146-II + agua de cal 180 días



Ceniza 146-II + agua de cal 210 días

Cuadro N.º 1

Composición química de las cenizas

NÚMERO	145	146-I	146-II	148	150	153	154
Carbono C	3,70	1,00	0,00		1,39	0,18	0,32
Azufre (SO ₂)	0,06	0,14	0,08			0,03	0,00
CO ₂	6,40				4,20	3,50	0,00
Soluble en HCl							
SiO ₂	5,39	5,16	3,65	1,22	7,13	10,04	1,93
Al ₂ O ₃	2,24	3,94	3,72	1,21	4,84	2,08	0,15
Fe ₂ O ₃	4,50	5,91	3,34	0,40	4,08	4,08	1,93
CaO	8,08	5,07	4,81	1,10	4,58	4,90	
MgO	0,17	0,34	0,95	0,14	0,32	0,32	
SO ₃	6,91	1,34	0,70		0,17	0,00	
Insoluble en HCl							
SiO ₂	32,68	33,42	39,89	63,73	36,14	32,29	63,91
Al ₂ O ₃	9,55	19,09	23,99	20,75	17,00	22,07	25,68
Fe ₂ O ₃	17,40	22,39	17,25	6,54	17,33	18,31	3,52
CaO	1,54	2,20	1,32	0,53	0,77	1,33	1,48
MgO	0,84		0,21	1,17	0,00	0,44	1,06
Alcalis y s.d.				3,21	2,05	0,43	0,02

Cuadro N.º 2

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas

GRAVIMETRIAS

Número Tiempo en días	145			146-I			146-II		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg. de CaO		velocidad de reacción	mg. de CaO		velocidad de reacción
	parciales	totales		parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	47,8	47,8	6,8	15,8	15,8	2,3	4,2	4,2	0,6
21 - 28	73,6	121,4	2,6	62,2	78,0	2,94	73,3	77,5	2,61
32 - 60	27,0	148,4	0,8	63,2	141,2	1,91	53,0	130,5	1,65
30 - 90	55,1	203,5	1,8	40,3	181,5	1,34	40,2	170,7	1,34
30 - 120	30,1	233,6	1,03	34,5	216,0	1,15	38,3	209,0	1,27
30 - 150	38,0	271,6	1,26	31,1	247,1	1,03	40,0	249,0	1,33
30 - 180	34,7	306,3	1,15	51,8	298,9	1,72	61,6	310,6	2,05
30 - 210	31,5	337,8	1,05	24,9	323,8	0,83	27,3	337,9	0,90
30 - 240	18,8	346,6	0,60	24,5	348,3	0,80	30,4	368,3	1,01
60 - 300	26,3	372,9	0,44	28,8	377,1	0,45	29,8	398,1	0,50
60 - 360	16,0	388,9	0,27	17,6	394,7	0,29	21,8	419,9	0,36
60 - 420	19,9	408,8	0,33	18,7	413,4	0,31	17,3	437,2	0,28

Cuadro N.º 3

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas

GRAVIMETRIAS

Número Tiempo en días	147			148		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción
	parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	18,6	18,6	2,7	32	32	4,57
21 - 28	91,1	109,7	3,26	84,9	116,9	4,00
32 - 60	33,9	143,6	1,06	27,9	141,8	0,78
30 - 90	50,9	194,0	1,69	63,2	205,0	2,10
30 - 120	41,5	236,0	1,38	43,5	248,5	1,45
30 - 150	46,0	282,0	1,53	40,0	288,5	1,33
30 - 180	54,0	336,0	1,80	34,0	322,5	1,13
30 - 210	57,0	393,0	1,90	29,8	352,3	0,99
30 - 240	28,3	421,3	0,94	31,3	383,6	1,04
60 - 300	41,8	463,1	0,70	38,8	422,4	0,65
60 - 360	33,2	496,3	0,55	27,7	450,1	0,46
60 - 420	16,8	513,1	0,28	27,8	477,9	0,46

Cuadro N.º 4

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas

GRAVIMETRÍAS

Número Tiempo en días	150			153			154		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción
parciales totales	parciales	totales		parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	36,2	36,2	5,17	6,0	6,0	0,85	6,4	6,4	0,91
21 - 28	86,3	122,5	4,10	27,5	33,5	1,30	81,2	87,6	3,86
32 - 60	54,5	177,0	1,70	54,5	88,0	1,70	56,4	144,0	1,75
30 - 90	44,6	221,6	1,48	47,1	135,1	1,57	42,4	186,2	1,41
30 - 120	44,9	266,5	1,50	38,8	173,9	1,27	37,3	223,5	1,24
30 - 150	40,1	306,6	1,33	32,0	205,9	1,06	33,9	257,4	1,13
30 - 180				25,2	231,1	0,84	20,7	278,1	0,69
30 - 210	43,4	350,0	0,72	44,5	275,6	1,45	33,9	312,0	1,13
30 - 240				19,0	294,6	0,63	24,8	336,8	0,82
30 - 270	32,7	382,7	0,49						
30 - 300				25,5	320,1	0,42	31,8	368,6	0,53

Cuadro N.º 5

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas

VOLUMETRÍAS

Número Tiempo en días	145			146-I			146-II		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción
parciales totales	parciales	totales		parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	66,9	66,9	9,6	23,8	23,8	3,4	9,24	9,24	1,32
21 - 28	58,7	125,6	2,9	48,93	72,73	2,33	54,60	63,84	2,60
32 - 60	28,1	153,7	0,88	60,80	133,53	1,90	45,76	109,60	1,43
30 - 90	39,0	192,7	1,3	25,80	159,33	0,86	42,00	151,60	1,40
30 - 120	31,14	223,84	0,9	47,70	207,03	1,59	30,00	181,60	1,00
30 - 150	36,30	260,14	1,21	90,60	297,63	3,02	44,10	225,70	1,47
30 - 180	31,20	291,34	1,04	34,50	332,13	1,15	39,30	265,00	1,31
30 - 210	20,36	311,80	0,68	28,00	360,13	0,93	28,3	293,30	0,94
30 - 240	18,74	330,54	0,60	18,10	378,23	0,60	27,3	320,60	0,91
60 - 300	13,79	344,33	0,23	21,30	399,53	0,36	25,4	346,00	0,42
60 - 360	19,08	363,41	0,32	20,49	420,02	0,34	21,6	367,61	0,36
60 - 420	14,87	378,28	0,24	11,79	431,81	0,20	17,64	385,25	0,29

Cuadro N.º 6

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas
VOLUMETRIAS

Número Tiempo en días	147			148		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción
parciales totales	parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	21,4	21,4	3,06	29,6	29,6	4,24
21 - 28	75,0	96,4	3,60	68,0	97,6	3,24
32 - 60	30,6	127,0	0,96	28,7	126,3	0,90
30 - 90	51,50	178,5	1,65	51,6	177,9	1,72
30 - 120	32,40	210,9	1,08	34,8	212,7	1,16
30 - 150	42,00	252,9	1,40	40,5	253,2	1,35
30 - 180	31,50	284,4	1,05	28,5	281,7	0,95
30 - 210	39,60	324,0	1,32	37,5	319,2	1,25
30 - 240	27,70	351,7	0,96	28,14	347,34	0,94
60 - 300	35,80	387,5	0,60	37,57	384,91	0,63
60 - 360	32,30	419,8	0,53	30,55	415,46	0,51
60 - 420	23,29	443,0	0,38	25,38	440,84	0,42

Cuadro N.º 7

Cantidades de CaO (en mg) fijadas por las cenizas
VOLUMETRIAS

Número Tiempo en días	150			153			154		
	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción	mg de CaO		velocidad de reacción
parciales totales	parciales	totales		parciales	totales		parciales	totales	
7 - 7	32,72	32,72	4,67	2,2	2,2	0,31	8,0	8,0	1,14
21 - 28	74,60	107,32	3,55	35,8	38,0	1,70	42,2	50,2	2,00
32 - 60	50,00	157,32	1,57	61,5	99,5	1,92	42,5	92,7	1,33
30 - 90	41,10	198,42	1,37	33,7	133,2	1,12	37,0	129,7	1,23
30 - 120	43,70	242,12	1,45	35,3	168,5	1,17	31,5	161,2	1,05
30 - 150	29,20	271,32	0,97	35,0	203,5	1,16	32,33	193,5	1,07
60 - 180				21,6	225,1	0,72	21,6	215,1	0,72
30 - 210	44,96	316,28	0,75	34,2	259,3	1,14	31,2	246,3	1,04
30 - 240				24,4	283,7	0,81	28,3	274,6	0,94
30 - 270	33,88	350,16	0,51						
30 - 300				25,0	308,7	0,41	32,2	306,8	0,53

Cenizas volantes

GRANULOMETRIAS

Número	145	146-I	146-II	146-III	150	153	154
Tamaños de granos en micras	%	%	%	%	%	%	%
1200	0,0	1,8	0,3	1,2	0,4	0,0	0,0
400	0,1	5,6	0,1	5,3	0,3	0,0	0,1
200	0,3	15,8	1,6	25,8	0,3	0,0	0,3
100	3,0	29,9	16,3	45,1	1,1	0,0	3,0
88	10,6	25,3	30,3	17,1	5,6	22,5	10,6
75							
50	2,4	0,0	18,7	1,8	29,9	6,6	2,4
Menor de 50		19,0	30,8	1,9	58,9	70,0	
45 a 30	1,67					1,4	1,67
30 a 15	36,78					25,2	36,78
15 a 0	45,14					43,4	45,14

Preparación y ensayo de aglomerantes portland-ceniza

Se prepararon mezclas de cemento portland y cenizas volantes mezclando los componentes a mano y refinando algo la mezcla en el molino «Vibraton», con el doble objeto de homogeneizar la mezcla, y en algunos casos, ganar finura. No se adicionó cantidad alguna suplementaria de

yeso, salvo las numeradas Z₁₇ a Z₂₄ destinadas a ensayar la influencia del mismo.

La composición de estas mezclas se detalla en el cuadro n.º 9; y la correspondiente a las otras mezclas, en el n.º 10.

Los cuadros 11, 12 y 13 contienen los datos de la composición del mortero ensayado, la granulometría del aglomerante y los valores de las resistencias mecánicas del mortero, respectivamente.

Cuadro N.º 9

Aglomerantes con cenizas volantes

COMPOSICION DE LAS MEZCLAS

Número	Cenizas N.º	Cemento N.º	Ceniza %	Cemento %
Z ₁	145	144	10	90
Z ₂	id.	id.	20	80
Z ₃	id.	id.	40	60
Z ₄	id.	id.	80	20
Z ₅	148	142	10	90
Z ₆	id.	id.	20	80
Z ₇	id.	id.	40	60
Z ₈	id.	id.	80	20
Z ₁₃	150	id.	10	90
Z ₁₄	id.	id.	20	80
Z ₁₅	id.	id.	40	60
Z ₁₆	id.	id.	80	20
Z ₂₅	153	id.	10	90
Z ₂₆	id.	id.	20	80
Z ₂₇	id.	id.	30	70
Z ₂₈	id.	id.	50	50
Z ₂₉	id.	id.	70	30
Z ₃₀	id.	id.	80	20
Z ₃₁	id.	id.	90	10
Z ₃₂	154	id.	10	90
Z ₃₃	id.	id.	20	80
Z ₃₄	id.	id.	30	70
Z ₃₅	id.	id.	50	50
Z ₃₆	id.	id.	70	30
Z ₃₇	id.	id.	80	20
Z ₃₈	id.	id.	90	10

Cuadro N.º 10

Composición de las mezclas destinadas al estudio de la influencia del yeso en las propiedades técnicas

CEMENTO 142 CENIZA VOLANTE 148

Z₁₇ (80 % de cenizas) y 2 % de yeso refinado en el molino
 Z₁₈ (80 % de cenizas) y 3 % de yeso id. id.
 Z₁₉ (80 % de cenizas) y 2 % de yeso sin refinar
 Z₂₀ (80 % de cenizas) y 3 % de yeso id. id.

Z₃₁ (20 % de cenizas) y 2 % de yeso refinado en el molino
 Z₃₂ (20 % de cenizas) y 3 % de yeso id. id.
 Z₃₃ (20 % de cenizas) y 2 % de yeso sin refinar
 Z₃₄ (20 % de cenizas) y 3 % de yeso id. id.

AGLOMERANTES: PORTLAND - CENIZAS DE CENTRAL TERMICA

MARCA	COMPONENTES	ARENA	DOSIFICACION	MARCA	COMPONENTES	ARENA	DOSIFICACION
Z ₁	Clinker n.º 144 83,5 % Cenizas n.º 145 10,0 Yeso crudo 6,5	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 194,6 c.c. de agua	Z ₁₇	Mezcla Z ₆ 98 % Yeso crudo 2	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₂	Clinker n.º 144 74,2 % Cenizas n.º 145 20,0 Yeso crudo 5,8	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 213 c.c. de agua	Z ₁₈	Mezcla Z ₆ 97 % Yeso crudo 3	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₃	Clinker n.º 144 45,65 % Cenizas n.º 145 50,0 Yeso crudo 4,35	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 232 c.c. de agua	Z ₁₉	Mezcla Z ₆ 98 % Yeso crudo 2	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 325 c.c. de agua
Z ₄	Clinker n.º 144 18,55 % Cenizas n.º 145 80,0 Yeso crudo 1,45	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 245 c.c. de agua	Z ₂₀	Mezcla Z ₆ 97 % Yeso crudo 3	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 325 c.c. de agua
Cem. Ck 144	Clinker n.º 144 92,2 % Yeso crudo 7,8	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 195,4 c.c. de agua	Z ₂₁	Mezcla Z ₆ 98 % Yeso crudo 2	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₅	Cemento 90 % Cenizas n.º 148 10	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 227,4 c.c. de agua	Z ₂₂	Mezcla Z ₆ 97 % Yeso crudo 3	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₆	Cemento 80 % Cenizas n.º 148 20	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 229 c.c. de agua	Z ₂₃	Mezcla Z ₆ 98 % Yeso crudo 2	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₇	Cemento 60 % Cenizas n.º 148 40	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 251,4 c.c. de agua	Z ₂₄	Mezcla Z ₆ 97 % Yeso crudo 3	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₈	Cemento 20 % Cenizas n.º 148 80	MANZANARES	600 gr de mezcla 1 litro de arena 304,2 c.c. de agua	Z ₂₅	Cemento 90 % Cenizas n.º 153 10	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
CEMENTO	Cemento Portland	MANZANARES	600 gr de cemento 1 litro de arena 221 c.c. de agua	Z ₂₆	Cemento 80 % Cenizas n.º 153 20	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₁₀	Cemento 90 % Cenizas n.º 150 10	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua	Z ₂₇	Cemento 70 % Cenizas n.º 153 30	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₁₁	Cemento 80 % Cenizas n.º 150 20	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua	Z ₂₈	Cemento 50 % Cenizas n.º 153 50	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₁₂	Cemento 60 % Cenizas n.º 150 40	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua	Z ₂₉	Cemento 30 % Cenizas n.º 153 70	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua
Z ₁₃	Cemento 20 % Cenizas n.º 150 80	RILEM NORMALIZADA	500 gr de mezcla 1.500 gr de arena 250 c.c. de agua				

(continúa en la página siguiente)

(continuación)

MARCA	COMPONENTES		ARENA	DOSIFICACION		MARCA	COMPONENTES		ARENA	DOSIFICACION	
Z ₃₀	Cemento	90 %	RILEM	500	gr de mezcla	Z ₃₀	Cemento	50 %	RILEM	500	gr de mezcla
	Cenizas n.º 153	80	NORMALIZADA	1.500	gr de arena		Cenizas n.º 154	50	NORMALIZADA	1.500	gr de arena
				250	c.c. de agua					250	c.c. de agua
Z ₃₂	Cemento	90 %	RILEM	500	gr de mezcla	Z ₃₂	Cemento	30 %	RILEM	500	gr de mezcla
	Cenizas n.º 154	10	NORMALIZADA	1.500	gr de arena		Cenizas n.º 154	70	NORMALIZADA	1.500	gr de arena
				250	c.c. de agua					250	c.c. de agua
Z ₃₃	Cemento	80 %	RILEM	500	gr de mezcla	Z ₃₇	Cemento	20 %	RILEM	500	gr de mezcla
	Cenizas n.º 154	20	NORMALIZADA	1.500	gr de arena		Cenizas n.º 154	80	NORMALIZADA	1.500	gr de arena
				250	c.c. de agua					250	c.c. de agua
Z ₃₄	Cemento	70 %	RILEM	500	gr de mezcla	Z ₃₈	Cemento	10 %	RILEM	500	gr de mezcla
	Cenizas n.º 154	30	NORMALIZADA	1.500	gr de arena		Cenizas n.º 154	90	NORMALIZADA	1.500	gr de arena
				250	c.c. de agua					250	c.c. de agua

Cuadro N.º 12

AGLOMERANTES: PORTLAND - CENIZAS DE CENTRAL TERMICA

MARCA	FLUOROMETRIA				TAMIZADO		MARCA	FLUOROMETRIA				TAMIZADO	
	< % 15	< % 30	< % 45	> % 45	Tamiz	Tamiz		< % 15	< % 30	< % 45	> % 45	Tamiz	Tamiz
	micras	micras	micras	micras	200	80		micras	micras	micras	micras	200	80
Z ₁	60	22	14	4	1,1 %	6,55%	Z ₂₁	56	41	2	1		
Z ₂	64	20	10	6	1,1 %	7,9 %	Z ₂₂	69,0	25,6	3,4	0,0	0,1 %	1,3 %
Z ₃	35,8	17,9	3,2	24,4	0,6 %	18,6 %	Z ₂₃	39,9	33,3	8,3	1,6	1,3 %	15,4 %
Z ₄	46,4	18,3	4,2	1,4	1,2 %	28,4 %	Z ₂₄	46,0	29,6	4,9	1,6	1,3 %	16,5 %
to							Z ₂₅	52,8	23,3	6,0	0,0	1,9 %	15,6 %
Cem. Ck 144	32,4	18,3	14	5,6	1,2 %	28,4 %	Z ₂₆	52,1	13,0	13,0	1,6	1,9 %	16,6 %
Z ₅	43,7	19,7	10,6	1,5	1,8 %	22,1 %	Z ₂₇	25,8	17,7	14,5	6,4	1,7 %	17,7 %
Z ₆	38,2	24,4	12,2	1,5	0,8 %	22,7 %	Z ₂₈	37,2	29,1	12,9	1,6	2,0 %	17,0 %
Z ₇	60,3	13,9	1,5	1,5	1,2 %	21,4 %	Z ₂₉	33,7	32,1	12,8	1,6	2,2 %	17,5 %
Z ₈	28,1	23,6	13,3	8,8	2,2 %	23,8 %	Z ₃₀	38,7	25,8	12,9	3,2	2,2 %	17,0 %
CEMENTO	45,2	30,7	4,0	0,8	2,4 %	16,8 %	Z ₃₁	39,4	22,9	16,4	3,3	2,2 %	15,7 %
Z ₁₃	46,6	27,6	9,5	2,6	0,45 %	13,3 %	Z ₃₂	45,2	26,7	10,0	1,7	2,4 %	13,9 %
Z ₁₄	44,9	39,6	1,7	0,0	1,5 %	12,3 %	Z ₃₃	42,1	30,3	10,0	1,7	1,5 %	14,3 %
Z ₁₅	42,8	36,6	8,0	1,8	1,6 %	9,1 %	Z ₃₄	42,8	30,8	10,3	1,7	1,3 %	13,0 %
Z ₁₆	33,5	29,8	11,1	0,0	1,2 %	5,6 %	Z ₃₅	37,2	35,5	10,1	1,6	0,8 %	15,6 %
Z ₁₇	32,1	37,8	20,8	3,8	0,1 %	5,4 %	Z ₃₆	37,6	35,8	11,8	3,5	0,5 %	10,0 %
Z ₁₈	53,1	23,0	9,7	2,6	0,1 %	11,3 %	Z ₃₇	41,6	39,8	7,2	1,8	0,7 %	8,7 %
Z ₁₉	33,8	33,8	7,7	1,5	2,1 %	21,0 %							
Z ₂₀	30,7	30,7	13,0	2,3	2,1 %	21,1 %							

AGLOMERANTES: PORTLAND - CENIZAS DE CENTRAL TERMICA

MARCA	RESISTENCIAS kg/cm ²						MARCA	RESISTENCIAS kg/cm ²							
	FLEXION			COMPRESION				FLEXION			COMPRESION				
	Días	3	7	28	3	7		28	Días	3	7	28	3	7	28
Z ₁			20,7	39,3		526	722,5	Z ₂₁			57,3	69		285,1	419,7
Z ₂			25	34		563	750,8	Z ₂₂			58,2	76		303,4	451,7
Z ₃			12,2	19,2		191	364,5	Z ₂₃			37	60,4		159,4	285,6
Z ₄			3,6	21,7		88,9	288	Z ₂₄			31,9	55,3		135,9	252,9
to								Z ₂₅	17,5		31,2	61,1	52	131,2	291,3
Cem. Ck 144			15,3	22,7		333,8	482,3	Z ₂₆	15,8		27,9	50,9	46,3	114,5	241,9
Z ₅			10,1	25,4		419,3	580	Z ₂₇	12,5		26,8	46,3	33,7	98	220,2
Z ₆			25,6	33,1		414	529	Z ₂₈	6,8		18,5	39,8	6,2	58	155,3
Z ₇			14,6	26,4		228,2	360	Z ₂₉	2,7		10,2	27,2	3,1	18,8	84,6
Z ₈				7,1		26,1	36,6	Z ₃₀	0		3,2	12,8	0	3,1	26,2
CEMENTO	17,9		33,8	64,0	65,5	154,2	324,5	Z ₃₂	20,5		32,5	56,6	81,9	138,9	278,3
Z ₁₃			50,5	63,7		183,7	351,5	Z ₃₃	18,8		28,2	26,6	62,9	99,1	231,4
Z ₁₄			34,4	55,6		176	294,6	Z ₃₄	12,5		23,2	40,9	30,5	70,6	171,8
Z ₁₅			17,6	47,5		50,9	203,1	Z ₃₅	6,6		11,7	25,5	6,2	17	64,5
Z ₁₆			4,5	15,5		3,1	45,2	Z ₃₆	3,7		5,7	13,4	1,8	4,6	20
Z ₁₇			8,6	24,3		12,6	59,8	Z ₃₇	2,2		4,7	10,4	0,0	3,1	13,8
Z ₁₈			4,6	21		6,2	45,3	Z ₃₈	0,0		2,2	4,6	0,0	0,0	4,6
Z ₁₉			3,4	11,9		1,5	14,2								
Z ₂₀			3	12		1,5	13,1								

Como puede apreciarse en el cuadro n.º 11, las resistencias de las mezclas compuestas con cenizas n.º 145 (Z₁ a Z₄) y n.º 148 (Z₅ a Z₈) se ensayaron en probetas preparadas según el Pliego español de 1930, mientras que para todas las demás se aplicaron las normas RILEM. Al usar estas últimas y, principalmente, en las series Z₁₇ a Z₂₄ proyectadas para conocer la influencia de la cantidad de yeso, fué necesario abandonar la proporción de agua, pues con los 500 ml de RILEM la fluidez del mortero era tal que ni a las 72 horas se habría iniciado el endurecimiento mínimo necesario para desmoldar los prismas.

El cemento portland utilizado como punto de referencia y componente de las mezclas Z₁ a Z₂₄ fué un portland preparado en el laboratorio mediante molturación y mezcla de un clínker comercial. En las demás mezclas, el cemento empleado ha sido un supercemento nacional.

Para juzgar en qué medida las cenizas volantes y las de parrillas contribuyen al desarrollo de resistencias mecánicas, se pueden comparar los resultados obtenidos a compresión con la ceniza 145 (mezclas Z₁ a Z₄) con los alcanzados por la 153 (mezclas Z₂₅ a Z₃₁).

La comparación de las resistencias del cemento tipo apreciadas con el mortero especial, con las alcanzadas por el mismo aglomerante utilizando el mortero RILEM, nos ha permitido reducir a esta última escala los valores de las mezclas Z₁ a Z₄, con lo cual es factible la comparación de los valores de estas mezclas con las del grupo Z₂₅ a Z₃₁.

Los resultados así corregidos, son:

% cenizas	cenizas de parrillas		cenizas volantes	
	7 días	28 días	7 días	28 días
10 %	184	253	131	291
20 %	199	265,5	114,5	242
40 %	67,6	129,0	48,4	120
80 %	31,5	102	39	26,2
		7 días	28 días	
	Cemento portland	154	324	

El aglomerante obtenido con estas cenizas de parrilla alcanza mejores resistencias, especialmente en mezclas pobres de portland, que el de cenizas volantes, si bien a largo plazo tienden a igualarse.

La influencia que puede tener la cantidad de yeso adicionada se puede apreciar en los ensayos de las mezclas Z₁₇ a Z₂₄. La serie Z₁₇ - Z₁₈ - Z₁₉ - Z₂₀ contienen cenizas volantes en gran proporción (80 %) y las dos primeras el yeso, sin refinar, en las proporciones del 2 y 3 %, respectivamente, mientras que las dos segundas difieren de ellas en que la mezcla de los tres componentes se refinó. Esto se refleja en los valores de las fracciones separadas en el flourometro.

Las mezclas Z₂₁ - Z₂₂ - Z₂₃ - Z₂₄ son similares a las anteriores, de las que difieren en el menor porcentaje de cenizas; en este caso el 20 %.

El cuadro n.º 13 reúne todos los resultados. De su examen parece deducirse que las mezclas más ricas en cenizas no ganan resistencias al incrementar el yeso y, al contrario, les ocurre con mezclas en que prepondera el portland. Es indiscutible la beneficiosa influencia de la finura. Quizás exista, para cada par de componentes (cenizas-portland), una cantidad óptima de yeso; también habría que experimentar el efecto de los hidratos menos ricos en agua, así como de las anhidritas.

Identificación de las cenizas en los aglomerantes

El fin, de orden más bien fiscal que científico, de estos ensayos impone una madurez experimental muy acentuada. Teniendo en cuenta el restringido carácter representativo de las muestras que hemos podido utilizar, el estudio se ha llevado a cabo como misión exploratoria, más bien para descartar métodos que para sentar conclusiones.

Hasta el momento hemos utilizado como parámetro la densidad absoluta del material y la cuantía del residuo insoluble. Quedan, en espera de aplicación, el ataque selectivo de los componentes mediante ácidos o bases orgánicos, por ejemplo el ácido pícrico, utilizado en la resolución de mezclas portland-puzolana, al parecer con éxito por Fratini en Italia, o las disoluciones de dimetilamina, aplicadas en Alemania por Keil y Gille a las escorias siderúrgicas, y la separación por medio de líquidos que posean una densidad intermedia a la de los componentes de la mezcla.

De momento estamos ensayando como criterio la variación del residuo insoluble del aglomerante cuando se le somete, durante un lapso de tiempo, a temperatura de 1.000 C y 1.100 C.

En el cuadro n.º 14 se tabulan los resultados de las medidas de la densidad. Se utilizó el método del picnómetro y, como líquido picnométrico, el alcohol bencílico, primero, y, más tarde, el etílico, pues se pudo apreciar cierta solubilidad de algunas cenizas en el primero, que se utilizaba para beneficiarse del elevado poder de mojadura que posee.

Como se puede apreciar no es la densidad un buen criterio para enjuiciar el problema, especialmente en orden cuantitativo, ya que estos materiales son de una heterogeneidad tal que, aun dentro de pequeñas porciones, se acusa lo suficiente para producir series de valores tan erráticos que el

método pierde eficacia. Si puede aceptarse, en principio, que una densidad baja en un aglomerante normalizado debe poner en guardia acerca de su posible contaminación o adulteración.

La otra serie de ensayos se realizó aplicando la cuantía del residuo insoluble. Se utilizaron no sólo la técnica del Pliego español vigente (1930), sino también su modificación aplicable a las puzolanas. Es notable la discordancia entre los resultados obtenidos según que se aplique uno u otro método. Cuadro 15.

Desde luego la variación de la cuantía del residuo se acusa, en forma destacadísima, en todas las mezclas y desde la de menor contenido en cenizas (10 %).

En definitiva, parece este medio uno de los mejores, especialmente si se aplica el método prescrito para los cementos.

Cuadro N.º 14

Aglomerantes con cenizas volantes

DENSIDADES

Mezclas y componentes	Valor medio	Valor calculado	Líquido	Mezclas y componentes	Valor medio	Valor calculado	Líquido
Cemento 144	3,06		Alcohol bencílico	Cemento 142	3,08		Alcohol bencílico
Z ₁ (10 %)	4,25	3,05	» »	Z ₂₅ (10 %)	2,67	2,97	» »
Z ₂ (20 %)	3,97	3,03	» »	Z ₂₆ (20 %)	2,89	2,87	» »
Z ₃ (40 %)	3,02	2,95	» »	Z ₂₇ (30 %)	2,83	2,77	» »
Z ₄ (80 %)	2,94	2,89	» »	Z ₂₈ (50 %)	2,75	2,61	» »
Ceniza 145	2,87		» »	Z ₂₉ (70 %)	2,54	2,46	» »
Cemento 142	3,08		» »	Z ₃₀ (80 %)	2,47	2,39	» »
Z ₅ (10 %)	2,88	2,84	» »	Z ₃₁ (90 %)	2,46	2,33	Alcohol etílico
Z ₆ (20 %)	2,48	2,63	» »	Ceniza 153	2,27		» »
Z ₇ (40 %)	2,56	2,04	» »	Cemento 142	3,08		» »
Z ₈ (80 %)	2,23	1,83	» »	Z ₃₃ (10 %)	2,84	2,93	» »
Ceniza 148	1,67		» »	Z ₃₄ (20 %)	2,82	2,81	» »
Cemento 142	3,08		» »	Z ₃₅ (30 %)	2,61	2,69	» »
Z ₁₃ (10 %)	2,77	3,02	» »	Z ₃₆ (50 %)	2,37	2,48	» »
Z ₁₄ (20 %)	2,66	2,97	» »	Z ₃₈ (70 %)	2,28	2,30	» »
Z ₁₅ (40 %)	2,49	2,77	» »	Z ₃₇ (80 %)	2,25	2,22	» »
Z ₁₆ (80 %)	2,61	2,68	» »	Z ₃₉ (90 %)	2,44	2,15	» »
Ceniza 150	2,60		» »	Ceniza 154	2,08		» »

De momento estamos ensayando como criterio la variación del residuo insoluble del aglomerante cuando se le somete, durante un lapso de tiempo, a temperatura de 1.000 C y 1.100 C.

En el cuadro n.º 14 se tabulan los resultados de las medidas de la densidad. Se utilizó el método del picnómetro y, como líquido picnométrico, el alcohol bencílico, primero, y, más tarde, el etílico, pues se pudo apreciar cierta solubilidad de algunas cenizas en el primero, que se utilizaba para beneficiarse del elevado poder de mojadura que posee.

Como se puede apreciar no es la densidad un buen criterio para enjuiciar el problema, especialmente en orden cuantitativo, ya que estos materiales son de una heterogeneidad tal que, aun dentro de pequeñas porciones, se acusa lo suficiente para producir series de valores tan erráticos que el

método pierde eficacia. Si puede aceptarse, en principio, que una densidad baja en un aglomerante normalizado debe poner en guardia acerca de su posible contaminación o adulteración.

La otra serie de ensayos se realizó aplicando la cuantía del residuo insoluble. Se utilizaron no sólo la técnica del Pliego español vigente (1930), sino también su modificación aplicable a las puzolanas. Es notable la discordancia entre los resultados obtenidos según que se aplique uno u otro método. Cuadro 15.

Desde luego la variación de la cuantía del residuo se acusa, en forma destacadísima, en todas las mezclas y desde la de menor contenido en cenizas (10 %).

En definitiva, parece este medio uno de los mejores, especialmente si se aplica el método prescrito para los cementos.

Cuadro N.º 14

Aglomerantes con cenizas volantes

DENSIDADES

Mezclas y componentes	Valor medio	Valor calculado	Líquido	Mezclas y componentes	Valor medio	Valor calculado	Líquido
Cemento 144	3,06		Alcohol bencílico	Cemento 142	3,08		Alcohol bencílico
Z ₁ (10 %)	4,25	3,05	» »	Z ₂₅ (10 %)	2,67	2,97	» »
Z ₂ (20 %)	3,97	3,03	» »	Z ₂₆ (20 %)	2,89	2,87	» »
Z ₃ (40 %)	3,02	2,95	» »	Z ₂₇ (30 %)	2,83	2,77	» »
Z ₄ (80 %)	2,94	2,89	» »	Z ₂₈ (50 %)	2,75	2,61	» »
Ceniza 145	2,87		» »	Z ₂₉ (70 %)	2,54	2,46	» »
Cemento 142	3,08		» »	Z ₃₀ (80 %)	2,47	2,39	» »
Z ₅ (10 %)	2,88	2,84	» »	Z ₃₁ (90 %)	2,46	2,33	Alcohol etílico
Z ₆ (20 %)	2,48	2,63	» »	Ceniza 153	2,27		» »
Z ₇ (40 %)	2,56	2,04	» »	Cemento 142	3,08		» »
Z ₈ (80 %)	2,23	1,83	» »	Z ₃₃ (10 %)	2,84	2,93	» »
Ceniza 148	1,67		» »	Z ₃₄ (20 %)	2,82	2,81	» »
Cemento 142	3,08		» »	Z ₃₅ (30 %)	2,61	2,69	» »
Z ₁₃ (10 %)	2,77	3,02	» »	Z ₃₆ (50 %)	2,37	2,48	» »
Z ₁₄ (20 %)	2,66	2,97	» »	Z ₃₈ (70 %)	2,28	2,30	» »
Z ₁₅ (40 %)	2,49	2,77	» »	Z ₃₇ (80 %)	2,25	2,22	» »
Z ₁₆ (80 %)	2,61	2,68	» »	Z ₃₉ (90 %)	2,44	2,15	» »
Ceniza 150	2,60		» »	Ceniza 154	2,08		» »

Aglomerantes con cenizas volantes

RESIDUO INSOLUBLE

MATERIAL	Calcu- lado	Media	Pliego español %	Calcu- lado	Media	Método para puzolanas %
Ceniza 145		65,75	66,31 - 65,20			
Cemento 144		0,42	0,39 - 0,44			
Z ₁ 10 % ceniza	6,95		7,18 - 7,11			3,18 - 3,31
Z ₂ 20 % »	13,48		11,19 - 10,41			10,25 - 7,58
Z ₃ 40 % »	26,53		25,03 - 25,76			14,80 - 15,40
Z ₄ 80 % »	52,64		48,93 - 47,46			28,85 - 28,76
Ceniza 148		93,48	93,28 - 93,68		42,24	42,34 - 42,14
Cemento 142		1,69	1,65 - 1,73		1,80	1,88 - 1,76
Z ₅ 10 % ceniza	10,87		11,04 - 11,11	5,84		10,33 - 15,73
Z ₆ 20 % »	20,00		20,25 - 20,40	9,89		18,07 - 24,97
Z ₇ 40 % »	38,41		39,60 - 37,58	17,98		33,91 - 33,68
Z ₈ 80 % »	75,12		75,52 - 75,23	34,15		68,42 - 67,71
Ceniza 150		72,77	72,54 - 73,00		44,70	45,02 - 44,38
Cemento 142		1,69	1,65 - 1,73		1,80	1,88 - 1,76
Z ₁₃ 10 % ceniza	8,80		9,51 - 9,85	6,10		6,15 - 5,70
Z ₁₄ 20 % »	15,90		19,51 - 19,79	10,40		14,06 - 13,37
Z ₁₅ 30 % »	30,12		38,82 - 38,37	18,97		24,06 - 25,01
Z ₁₆ 40 % »	58,55		61,99 - 61,83	36,12		42,82 - 43,12
Ceniza 153		74,90	77,81 - 72,48		55,05	54,94 - 55,16
Cemento 142		1,69	1,65 - 1,73		1,80	1,88 - 1,76
Z ₂₅ 10 % ceniza	8,01		9,89 - 9,88	7,14		6,49 - 6,33
Z ₂₆ 20 % »	16,33		17,53 - 18,00	12,47		12,84 - 12,77
Z ₂₇ 30 % »	23,65		24,40 - 24,52	17,79		16,73 - 17,32
Z ₂₈ 50 % »	38,30		41,65 - 41,44	28,44		28,08 - 28,09
Z ₂₉ 70 % »	52,94		55,17 - 56,23	39,08		39,56 - 39,83
Z ₃₀ 80 % »	60,24		65,62 - 66,28	44,40		43,73 - 44,03
Z ₃₁ 90 % »	67,58		73,05 - 73,30	49,73		48,86 - 49,16
Ceniza 154		95,26	95,35 - 95,18		86,06	86,26 - 85,83
Cemento 142		1,69	1,65 - 1,73		1,80	1,88 - 1,76
Z ₃₂ 10 % ceniza	11,05		11,07 - 11,20	10,24		9,46 - 9,46
Z ₃₃ 20 % »	20,40		30,05 - 20,14	18,66		17,89 - 18,08
Z ₃₄ 30 % »	29,76		20,31 - 29,70	27,09		26,96 - 27,28
Z ₃₅ 50 % »	48,48		48,58 - 48,31	43,94		43,17 - 43,10
Z ₃₆ 70 % »	67,19		66,52 - 65,97	60,79		59,90 - 59,61
Z ₃₇ 80 % »	76,53		76,30 - 76,15	69,21		69,51 - 76,29
Z ₃₈ 90 % »	85,90		85,60 - 85,48	77,63		77,21 - 77,21