

Empleo de las cenizas volantes en capas de base de firmes de carreteras (*)

Por **IGNACIO GARCIA-ARANGO CIENFUEGOS-JOVELLANOS**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

y **FERNANDO HACAR RODRIGUEZ**

Ingeniero Técnico de Obras Públicas.

Demarcación de Carreteras del Estado-Asturias.

Las cenizas volantes pueden emplearse satisfactoriamente en capas de base de firmes de carreteras. En el artículo se presenta un estudio completo de las posibilidades de aplicación de este material y de su utilización en una obra viaria, describiéndose el proyecto, ejecución, ensayos y conclusiones extraídas de la experiencia.

1. INTRODUCCION

Existen diversos tipos de bases tratadas con conglomerantes hidráulicos, cada una con sus ventajas y sus inconvenientes. Así, las tratadas con cemento dan lugar a fisuraciones y erosiones superficiales si la dosificación y resistencia son bajas; las gravas-escorias presentan determinados problemas en su contacto con el aglomerado, en presencia de agua.

Nuestro equipo tuvo conocimiento de la introducción de las cenizas, mezcladas con cal, como conglomerante, en diversas obras realizadas en Francia y en Estados Unidos, analizando tanto los resultados como la normativa aplicada en esas obras. Se establecieron contactos con el Instituto Eduardo Torroja y se estudio la documentación por el realizada, tanto sobre las diversas cenizas disponibles en España, como sobre la realización de mezclas de grava-ceniza-cemento, sustituyendose así la cal por el cemento, con resultados similares.

Con esas ideas se intentó llevar a la realidad el empleo de una nueva base de grava-ceniza-cemento. La ceniza no fue problema, pues en Asturias existe en abundancia. La cal en España es escasa y con poca garantía de calidad, y sin embargo, el cemento es abundante y de buena calidad.

El presente escrito pretende informar acerca

de la base de grava-cenizas-cemento, describiendo:

- Lo que son las cenizas.
- Los estudios realizados por el Instituto Eduardo Torroja.
- La obra elegida como prueba.
- La redacción del Proyecto de la misma.
- Su construcción.
- Los resultados de la obra de prueba.
- Las conclusiones más importantes.

2. LAS CENIZAS VOLANTES

2.1. Definición.

Se llaman cenizas a los elementos incombustibles de un combustible sólido que, terminada la combustión, se encuentran en estado pulverulento o en cualquier forma sólida y más o menos vitrificados cuando han pasado por el estado líquido o pastoso. En particular, nos ocuparemos de las cenizas producidas en la combustión del lignito, hulla y antracita.

La combustión del carbón puede hacerse partiendo de éste en elementos gruesos o pulverizados, siendo lo habitual en las grandes centrales termicas la pulverización. El primer procedimiento (combustión de elementos gruesos, actualmente de valor casi histórico) da lugar a un 90 por 100 de cenizas gruesas o cenizas de hogar, y a un 10 por 100 de cenizas volantes o cenizas que son arrastradas por los gases de la combustión. El segundo procedimiento (com-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de julio de 1988.

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

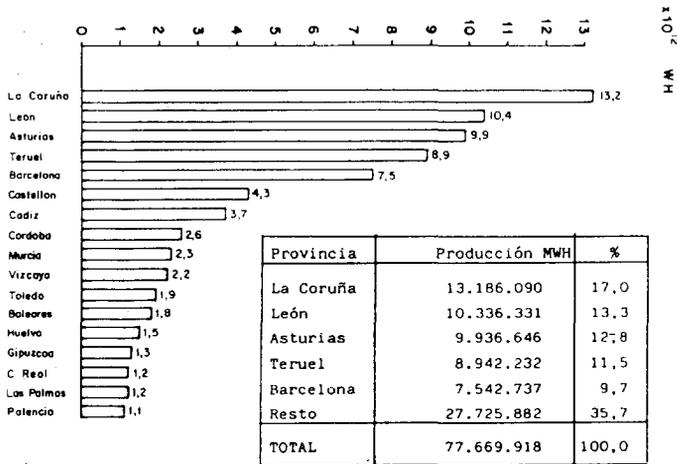


Figura 3.—Principales provincias productoras de energía termoeléctrica en 1984.

En cuanto a las actividades industriales consumidoras de carbón con posibilidades desde el punto de vista que nos ocupa, destacaremos las siderúrgicas, las cementeras y las centrales térmicas.

En las siderúrgicas las cenizas se recogen conjuntamente con los residuos del mineral de hierro, formando las escorias; en las cementeras las cenizas salen mezcladas con otros elementos propios del cemento; siendo, por último, los consumidores fundamentales de carbón, y las que producen las cenizas volantes propiamente dichas, las centrales térmicas de carbón. Por

Tipo de carbón	Billones de calorías	Miles de T	Millones de m ³
Hulla			
1. Hulla rica	9.583	1.488	
2. Hulla pobre	40.443	8.386	
TOTAL	50.026	9.874	
Antracita			
3. Antracita pobre ...	22.161	4.497	
TOTAL	22.161	4.497	
Lignito			
4. Lignito negro	21.327	7.009	
5. Lignito pardo	38.445	14.492	
TOTAL	59.772	24.501	
Productos petrolíferos			
6. Fuel-Oil	58.802	5.757	
7. Otros	969	91	
TOTAL	59.771	5.848	
Bases			
8. Gas natural	8.434		819
9. Otros	1.101		1.002
TOTAL	2.535		1.821
Nuclear			
10. Uranio natural	9.729	85.342 kg	
11. Uranio enriquecido	20.947	59.115 kg	
TOTAL	30.676	144.457 kg	
Otros			
12. Otros	1.427	399	
TOTAL	14.276	399	
TOTAL	233.368		

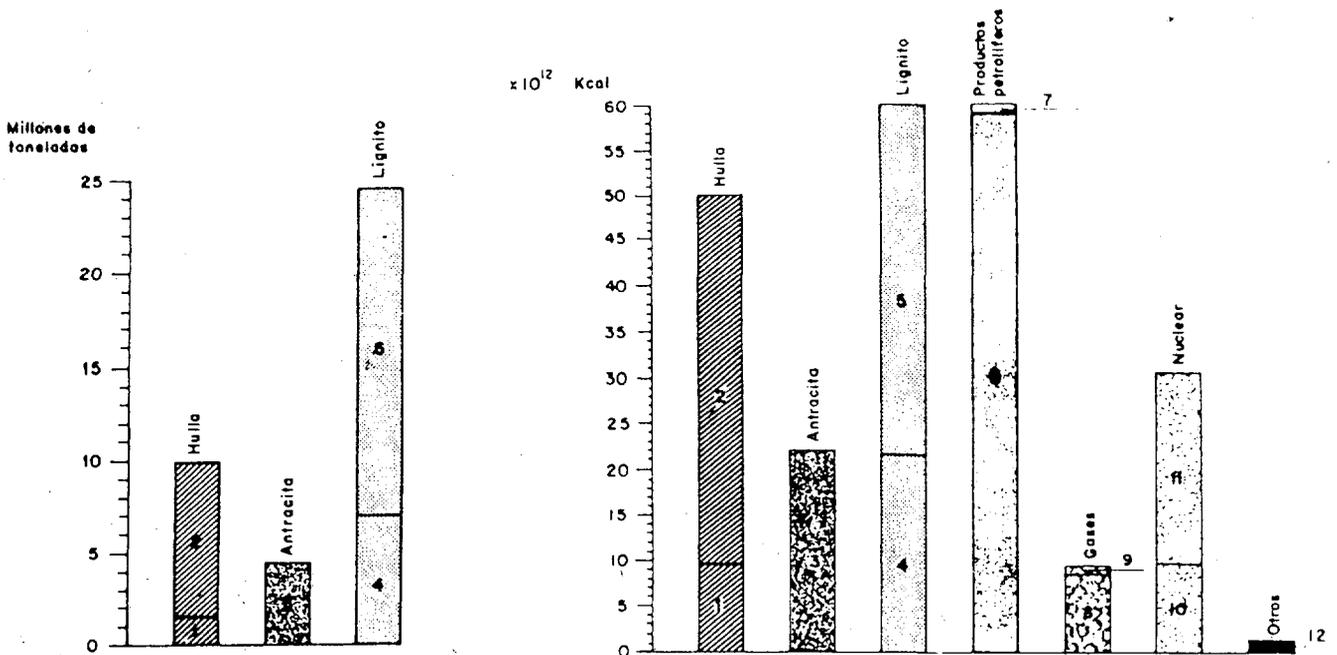


Figura 4.—Combustibles empleados en España para la producción de energía eléctrica (1983).

ello nuestro estudio se centrará en esa actividad industrial, no ocupándose de la posible utilización de las cenizas de otra procedencia.

Al finales de 1983, en España, existían un total de 1.287 centrales productoras de electricidad (incluyendo 377 centrales autoproducidas) con una potencia total instalada de 35.612 MW (el 49,5 por 100 en centrales térmicas), (Fig. 2):

También es interesante destacar que en cinco provincias se concentra el 64,3 por 100 de la producción total anual (Fig. 3):

Con el fin de poder calcular la producción de cenizas volantes en España, vamos a analizar los consumos de los diferentes tipos de carbones empleados en las centrales térmicas.

En la figura 4 se indican los combustibles consumidos en España para la producción de energía eléctrica en el año 1983. Si la producción total de cenizas (volantes y de hogar) supone el 30 por 100 del carbón quemado, y de esas, el 60 por 100 son cenizas volantes recuperadas, o lo que es lo mismo, el 18 por 100 del carbón quemado, resultarían unos 7 millones de toneladas producidas en 1983.

Este importante volumen de cenizas volantes crece si se considera la implantación de las nuevas centrales (con el Plan Acelerado de Centrales Térmicas de Carbón, ya en 1984 se instalaron 2.300.000 Kw de potencia en nuevas centrales consumidoras de carbón). Esta magnitud de cenizas hace, tanto desde el punto de vista ecológico como del utilitario, imprescindible la búsqueda de nuevas aplicaciones que se sumen a la única realmente consolidada, la de las cementeras, que consume tan sólo el 10 por 100 de la producción total.

2.4. Propiedades físico-químicas de las cenizas volantes.

Las propiedades de las cenizas dependen, tanto del tipo de carbón, como de los procesos sufridos en la combustión del mismo; tipo de horno, continuidad en su funcionamiento, sistema de captación, velocidad a la que se realiza el enfriamiento, etc. Por su importancia en la exposición de la naturaleza de las cenizas, se describe a continuación el origen geológico del carbón.

Los carbones se forman por la descomposición anaerobia de la materia vegetal (acumulada en el fondo de pantanos, lagunas o deltas) a consecuencia de la humedad, del aumento de la presión y de la temperatura.

Sobre el origen del carbón existen dos teorías explicativas; la autóctona (según la cual el carbón se forma en el interior de áreas continentales, bien en lagos o cuencas límnicas, bien en llanuras costeras o cuencas parálicas, pero siempre en el mismo sitio en que los vegetales se han desarrollado), y la alóctona (que supone un previo transporte de los detritus hasta el lugar en que se forma el carbón), pudiendo superponerse ambas explicaciones en determinados yacimientos.

La carbonización o hullificación es el conjunto de procesos por los que la materia vegetal original se transforma en carbón, disminuyendo en materias volátiles y aumentando en carbono.

Las turbas son los carbones que se están formando en la actualidad. Es el sentido más amplio, las turberas son las formaciones vegetales que se desarrollan sobre los suelos húmedos y sumergidos, con poca circulación y escasa aireación, así los materiales orgánicos se descomponen en un ambiente reductor, favorecido por la acumulación de nuevo material, hasta que llega un momento en que cesa esa actividad anaerobia. Como consecuencia de éstos procesos se obtiene a partir de la superficie, una variación progresiva en la constitución de la turba, desde turba clara, suelta, con detritus vegetales sueltos, hasta turba negra, compacta, con elementos vegetales poco reconocibles.

A partir de éste momento ya sólo las acciones de la presión y la temperatura intervienen en la formación sucesiva de lignito, hulla y antracita. En la figura 5 se sintetizan las principales transformaciones que se producen.

2.4.a Aspecto exterior y finura de las cenizas volantes.

Las cenizas volantes secas tienen el aspecto de un polvo muy fino grisáceo (Fig. 6).

Según sea la composición química del carbón y tipo de caldera, las cenizas tendrán una u otra composición. De forma general, la combustión

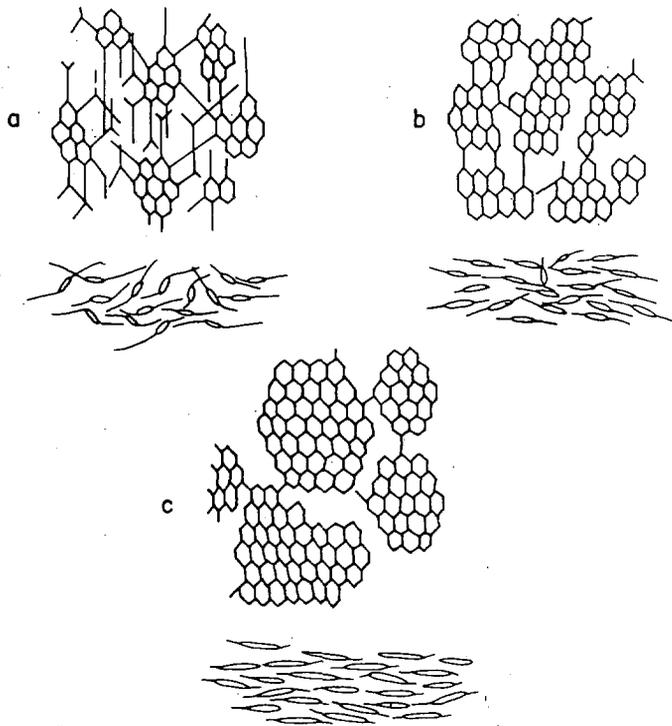


Figura 5.—Principales aspectos de la transformación del carbón. Alteraciones de la vitrita durante el proceso de carbonatación: a) Hullas de alto contenido en volátiles (35 % mat. vol.); b) Hullas de contenido medio en volátiles (22 % mat. vol.); c) Antracita (5 % mat. vol.).

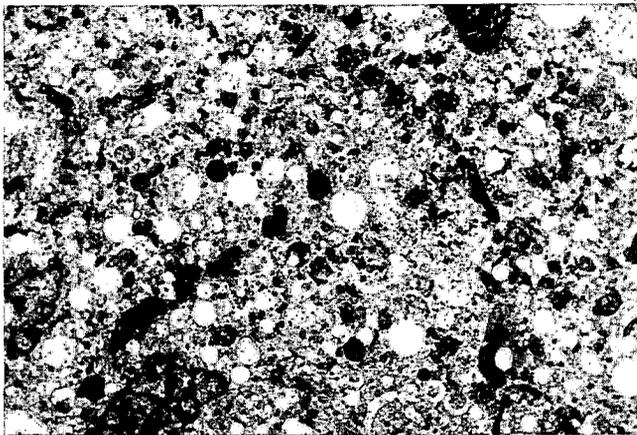


Figura 6.—Microfotografías de las cenizas volantes de la central térmica de Aboño, Asturias. (Cortesía de EGEO, S. A., Madrid).

Descripción petrográfica: Casi toda la matriz está compuesta por esferulitas vítreas, debidas a un enfriamiento rápido en suspensión. También se observan algunos pequeños cristales de cuarzo (tridimita y cristobalita) y minerales opacos (fragmento de carbón inquemado, sulfuros, etc...). El tamaño medio de las esferulitas es de 0,075 mm de diámetro, observándose en la muestra diámetros de hasta 0,750 mm.

del carbón, y su posterior y rápido enfriamiento, hará que las cenizas tengan una textura fundamentalmente vítrea, con pocos cristales y con restos de inquemados.

Las cenizas volantes tienen un tamaño comprendido entre 1 y 200 μ . Es normal expresar la finura de las cenizas volantes mediante la superficie específica Blaine, que se determina midiendo la permeabilidad al aire de una muestra en el permeabilímetro de Blaines (Fig. 7); expresando la finura en unidades Blaine (1 Blaine es la superficie en cm². de 1 gr. del material estudiado).

En las cenizas brutas la finura oscila entre 2.800 y 3.800 Blaines, pudiendo alcanzar 1.800 y 5.000 Blaines; los cementos vienen a tener 3.000 Blaines.

Empleando molinos de bolas puede aumentarse la finura notablemente (Fig. 8), llegando a duplicarse en 1 hora.

2.4.b Densidad aparente y peso específico de las cenizas

La densidad aparente de las cenizas volantes secas varía entre 0,50 y 1,00. El peso específico de las partículas oscila entre 1,80 y 2,80, aumentando según lo haga la superficie específica, pues a mayores finuras se elimina el aire oculto.

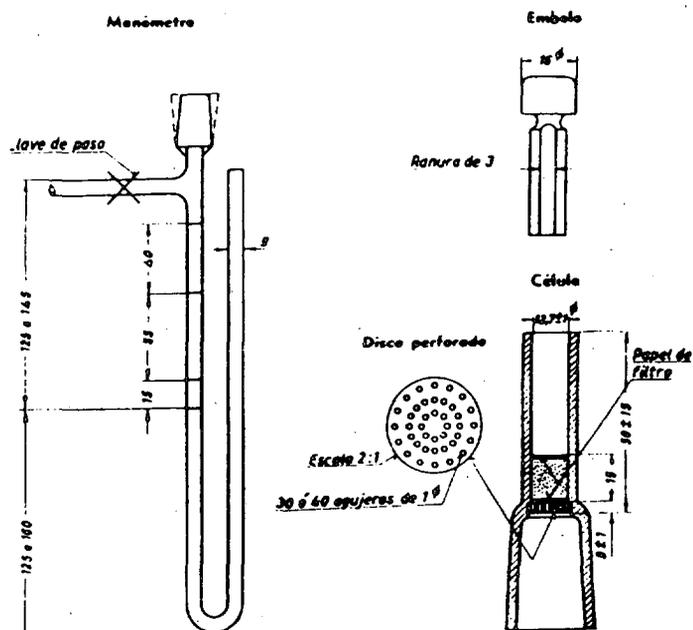


Figura 7.—Permeabilímetro Blaine.

do dentro de los granos (en la figura 9 se representan las densidades para diversas superficies específicas; éstos datos corresponden a muestras tomadas en fechas diferentes en una central térmica francesa).

2.4.c Composición química de las cenizas.

La composición química de las cenizas volantes es muy variable, dependiendo del tipo de carbón y de su origen, del proceso de funcionamiento de la caldera, del sistema y momento en que sean captadas, etc.

Fundamentalmente están formadas por sílice SiO_2 , alumina Al_2O_3 , óxidos de hierro Fe_2O_3 , cal CaO , magnesia MgO , álcalis $Na_2O + K_2O$, y anhídrido sulfúrico SO_3 .

En la figura 10 se indica la composición química de algunas cenizas volantes y materiales afines.

Según la nomenclatura que utiliza A. Pasquet pueden distinguirse dos tipos de cenizas volantes,

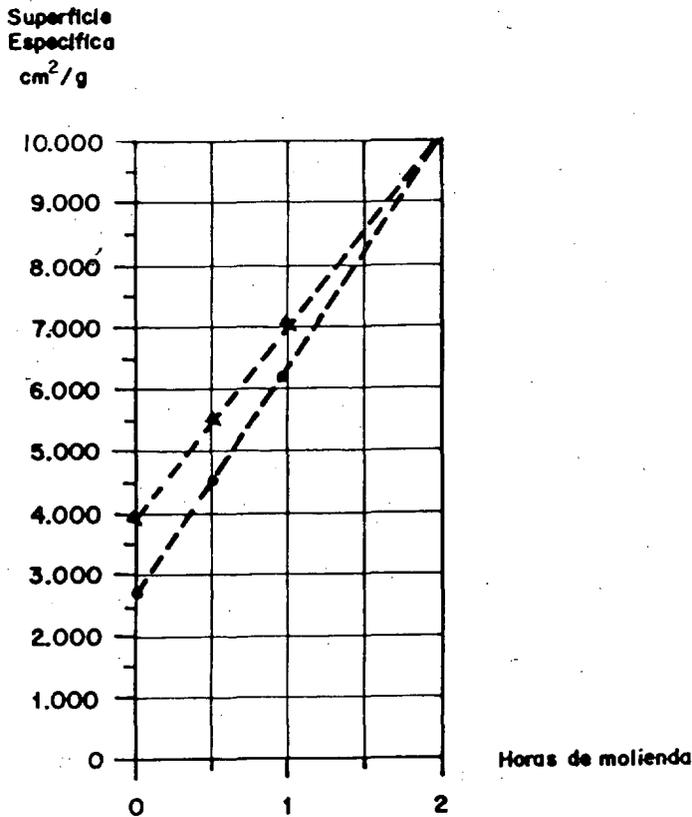


Figura 8.—Aumento de la superficie especigráfica Blaine de las cenizas volantes con la molienda.

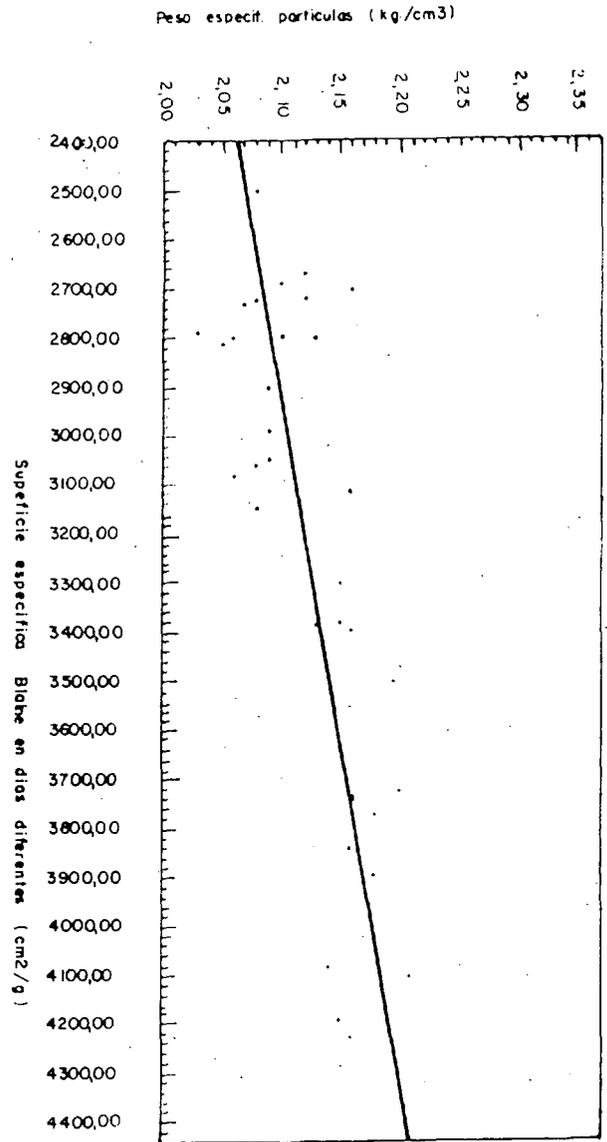


Figura 9.—Variación de la superficie especigráfica y peso específico; muestras tomadas en fechas diferentes en una central térmica de Francia.

tes, las hidráulicas o sulfocálcicas y las puzolánicas o silicioaluminosas.

Las cenizas sulfocálcicas (proviene generalmente de la combustión de lignitos) se caracterizan por fraguar con la presencia de agua. En la composición química el contenido de cal es elevado (36 al 45 por 100), y con la sílice y la alumina fraguan formando silicatos y aluminatos de cal. Para valorar la actividad hidráulica puede emplearse el módulo hidráulico que es la relación entre el CaO , MgO y SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

El segundo grupo de cenizas volantes son las

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

Procedencia	Si O ₂	Al ₂ O ₂	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	S o ₃	Alcal	P.F.
EE.UU.	36,00	24,00	16,00	5,00	1,25	2,10	—	10,75
España								
Almería	43,70	31,60	13,90	4,60	1,00	1,60	—	3,00
Badalona	44,20	18,90	11,50	—	1,00	3,40	0,50	0,80
Cádiz	43,70	31,60	13,90	4,60	1,00	1,60	—	3,00
Málaga	34,70	31,60	13,90	4,60	1,00	1,60	—	3,00
Puertollano	46,90	34,80	11,00	4,10	1,50	—	0,80	—
Abono	46,80	30,20	8,50	5,60	2,10	0,40	—	5,70
Compostilla	48,00	23,70	8,10	2,30	1,90	0,23	5,40	9,10
Meirama	50,20	28,10	7,80	2,90	1,70	0,39	1,10	2,30
Serchs	41,20	15,00	8,30	25,00	1,20	2,60	2,54	2,40
Soto de Ribera	49,60	27,80	7,10	2,40	1,60	0,77	5,20	4,30
Francia								
Antracita	42,20	19,00	17,00	10,00	6,60	1,00	3,20	—
Beuvry	47,30	28,60	8,60	4,00	1,40	—	6,40	—
Blenod	49,35	25,40	10,80	1,51	1,70	—	2,08	5,00
Bully	47,20	27,00	11,00	2,90	2,00	0,50	5,20	—
Carbón de Hulla	50,00	31,50	7,55	2,65	1,95	0,50	4,10	—
Choques	46,80	34,60	7,40	2,80	2,30	0,60	2,80	—
Creil	48,90	25,80	7,70	3,80	2,10	—	4,80	6,00
Dechi	46,90	29,60	5,90	1,50	1,60	0,50	3,50	—
Dorniges	46,60	29,10	4,50	2,10	1,40	0,10	6,60	—
Harnes	47,70	27,90	8,10	2,70	2,60	0,60	3,00	—
Labouissiere	47,70	33,40	6,90	3,30	2,20	0,60	4,10	—
Lignitos de Land.	81,50	8,50	3,60	3,00	1,30	1,35	0,60	—
Lignitos de Provenza	21,00	13,00	6,75	47,00	2,35	6,20	6,40	—
Tiers	46,00	29,10	4,60	3,10	1,10	0,70	5,80	—
Vendin	42,30	27,00	7,40	2,10	1,80	0,50	2,70	—
Inglaterra								
Carmarthen Bay	41,40	23,90	12,90	2,50	1,80	0,70	4,50	—
Castle Donington	45,90	24,40	12,30	3,60	2,50	0,90	4,20	—
Cliffquay	45,40	25,50	13,50	3,20	2,20	1,20	3,40	—
Croydon	42,80	26,10	9,30	2,40	1,40	0,60	4,20	—
Dunston 1	47,70	28,60	8,30	2,10	1,90	1,40	3,00	—
Dunston 2	50,70	34,10	6,40	1,70	1,70	0,60	2,10	—
Ferrybridge 1	48,70	27,90	9,50	2,40	1,60	1,20	5,70	—
Ferrybridge 2	47,40	27,50	10,30	2,10	2,00	1,80	5,70	—
Hams Hall	48,60	28,00	8,10	3,40	1,90	1,30	5,00	—
Rye House	43,60	24,60	11,30	7,70	2,90	1,20	2,90	—
Skelton Granger 1	47,20	26,70	11,90	3,40	1,90	1,00	4,70	—
Skelton Granger 2	46,50	26,60	12,10	2,70	1,70	1,10	5,00	—
Stella South	46,10	27,50	11,80	3,70	2,40	2,50	2,40	—
Uskmouth	44,20	26,50	3,60	1,90	1,60	0,80	4,40	—
Polonia								
Cenizas de Hulla	50,00	23,00	11,75	7,00	2,75	1,90	2,00	—
Cuenca Turoszow	48,50	30,00	18,00	3,25	0,15	0,50	0,00	—
Región de Konin	26,50	3,00	8,50	45,00	3,00	12,50	0,20	—
PUZOLANAS ORIGEN MINERAL								
Piedra pómez C. Real	42,20	14,90	12,10	12,00	11,00	—	3,30	—
Piedra pómez Gerona	42,50	13,50	13,50	8,80	9,10	0,46	5,60	—
Puzolana Segni	44,10	17,30	10,70	12,00	2,00	—	4,50	—
Puzolana San Pablo	45,20	20,00	10,70	9,80	3,80	0,30	6,20	—
Puzolana Baía	59,50	19,30	3,30	2,10	0,20	0,20	0,20	11,30
Trass Renano	54,80	17,20	5,00	2,30	0,90	0,10	10,80	—
Trass Rumano	62,50	11,60	1,80	6,60	0,70	—	2,90	—
Riolita Norteamericana	65,70	15,90	2,50	3,40	1,30	—	6,90	—
PUZOLANAS DE ORIGEN ORGANICO								
Gaize	69,50	16,10	5,20	5,60	1,40	0,40	—	—
Moler	66,70	11,40	7,80	2,20	2,10	—	—	—
Tripoli	83,10	8,20	2,70	1,40	1,10	0,20	0,20	—
Diatomita	86,00	2,30	1,80	—	0,60	—	0,40	—

Figura 10.—Composición química de algunas cenizas volantes y materiales afines.

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

Denominación	Composición
Portland	Clinker + regulador de fraguado.
Portland con adiciones activas	Clinker + regulador (> 80 %) + escoria y puzolana (≤ 20 %).
Siderúrgicos	Clinker + regulador de fraguado (> 20 % y < 80 %) + escoria siderúrgica (< 80 y > 20 %).
	Clase I: escoria ≤ 30 y > 20
	Clase II: escoria ≤ 50 y > 30
	Clase III: escoria < 80 y > 50
Puzoláneo	Clinker + regulador de fraguado (< 80 %) + puzolana (> 20 %).
	Clase I: no contienen cenizas volantes.
	Clase II: con cenizas volantes.
Compuestos	Clinker + regulador de fraguado (≥ 65 %) + adiciones inertes (≤ 35 %)
Aluminoso	Clinker de cemento aluminoso (cenizas + bauxita, con un contenido mínimo de alúmina del 35 %).
Naturales	Calcinación de margas naturales.

Tipos	Clases	Categorías	Designaciones
Portland		350	P-350
		450	P-450
		550	P-550
Portland con adiciones activas		350	PA-350
		450	PA-450
		550	PA-550
Siderúrgico	I	350	S-I-350
		450	S-I-450
	II	350	S-II-350
Puzolánico	I	250	PUZ-I-250
		350	PUZ-I-350
		450	PUZ-I-450
	II	250	PUZ-II-250
		350	PUZ-II-350
		450	PUZ-II-450
Compuesto		200	C-200
Aluminoso		550	A-550
Natural	Lento	30	NL-30
		80	NL-80
	Rápido	20	NR-20

Figura 11.—Tipos de cementos según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la Recepción de Cementos (1975).

puzolánicas o silicoaluminosas, conteniendo sílice y alumina, capaces de unirse a la cal en pre-

sencia de agua y a temperatura ordinaria, produciendo el endurecimiento de la pasta.

2.4.d Actividad puzolánica de las cenizas.

Como las define J. Calleja, las puzolanas son materiales carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí solas, contienen constituyentes que se combinan con la cal a temperatura ordinaria, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerados hidráulicos.

Es oportuno señalar que, en el caso de las escorias, el comportamiento hidráulico se manifiesta por la acción de un activador químico, que actuando catalíticamente, hace que dichas escorias fragüen; normalmente ese activador es el hidróxido cálcico. En las puzolanas se producen compuestos hidráulicos por verdadera interacción química; la puzolana aporta un componente (normalmente sílice activa) que reacciona con la cal (hidróxido cálcico). Es decir, la cal actúa como un reactivo, mientras que en el caso de las escorias era un catalítico.

El clinker de cemento Portland se obtiene por calcinación, hasta fusión parcial, de una mezcla íntima de calizas y arcillas y otros materiales en cuya composición entre el óxido silícico, aluminico y férrico como componentes básicos. El cemento Portland se obtiene mediante la molienda conjunta del clinker y la cantidad adecuada de un retardador del fraguado (normalmente es el sulfato cálcico, que actúa impidiendo la rápida precipitación de los aluminatos hidratados). Por último, para aportar alguna cualidad adicional al cemento, o mejorar alguna característica del mismo, en la molienda se puede añadir algún material (escorias, puzolanas, etc.). En la figura 11 se recogen los tipos de cementos según el Pliego de España (RC-75).

El clinker de cemento Portland está formado fundamentalmente por CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 (C, S, A, F). Estos forman los siguientes constituyentes:

$\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 =$ Silicato tricálcico.
 $\beta\text{-C}_2\text{S} = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \beta$ -Silicato dicálcico.
 $\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 =$ Aluminato tricálcico.
 $\text{C}_4\text{AF} = 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 =$ Ferroaluminato tetracálcico.

Al mezclar el cemento con agua, en propor-

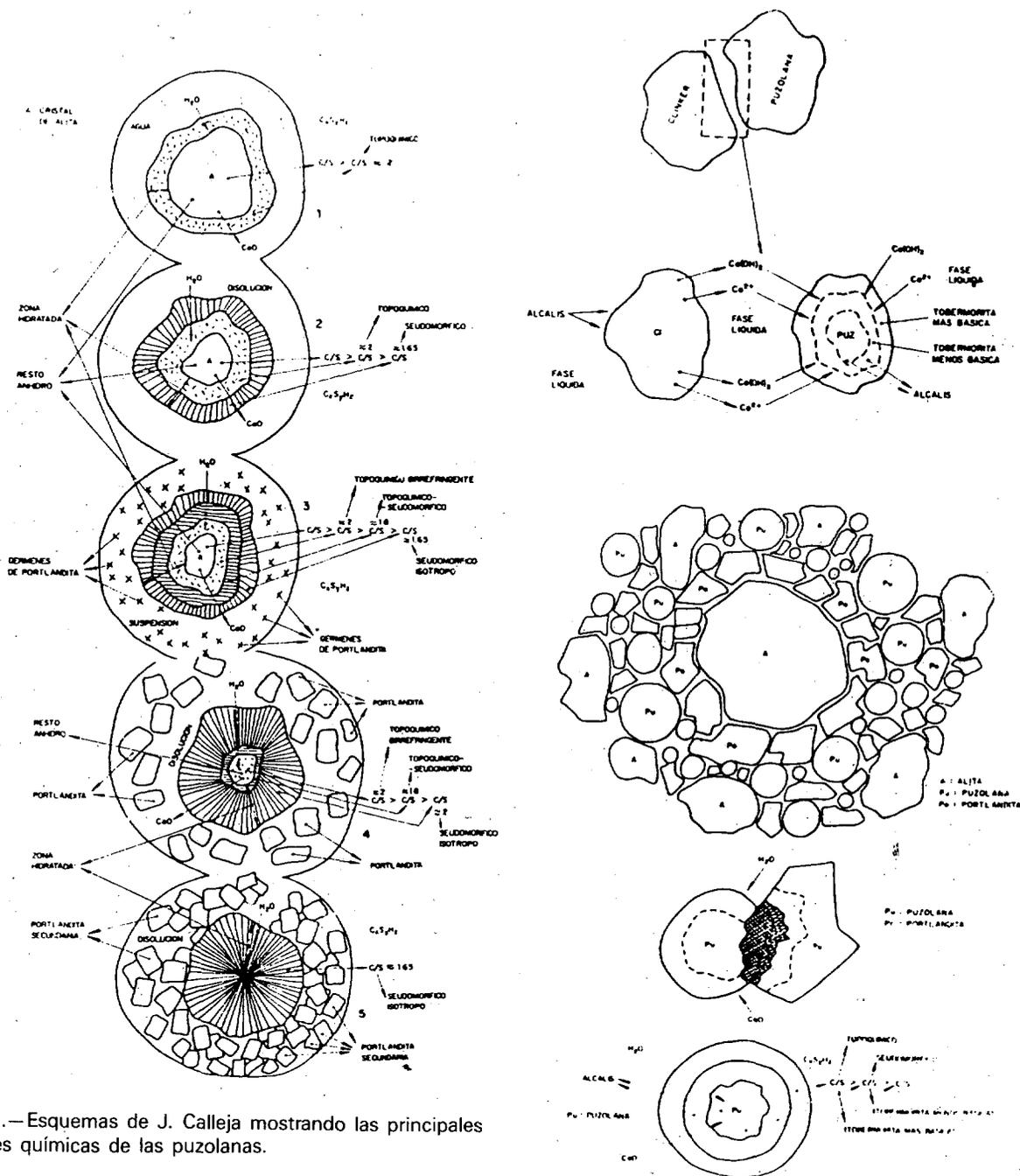


Figura 12.—Esquemas de J. Calleja mostrando las principales reacciones químicas de las puzolanas.

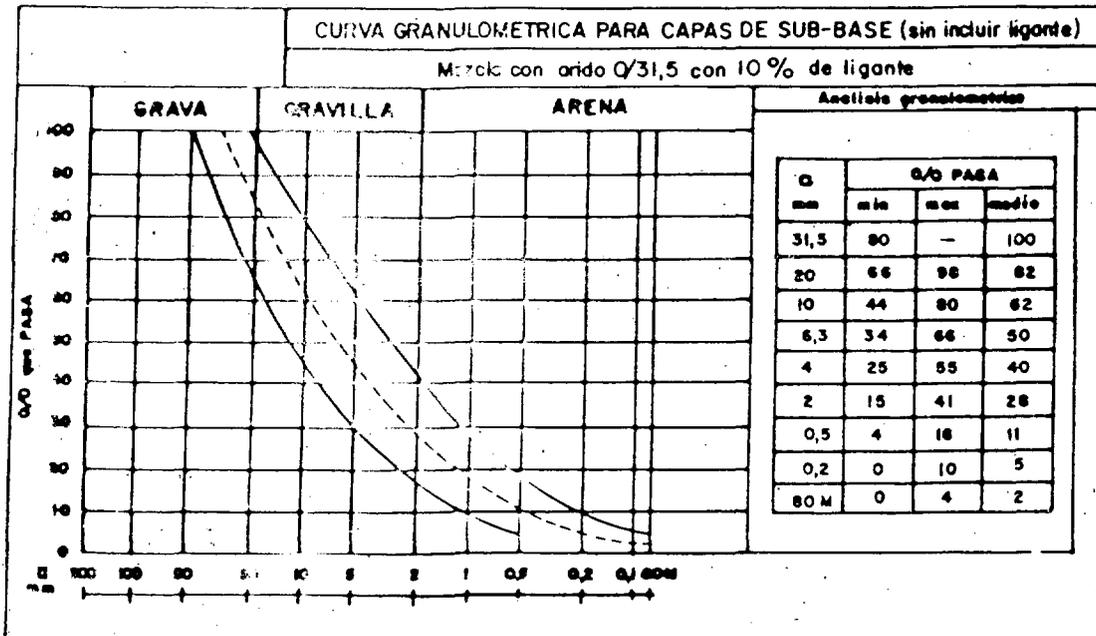
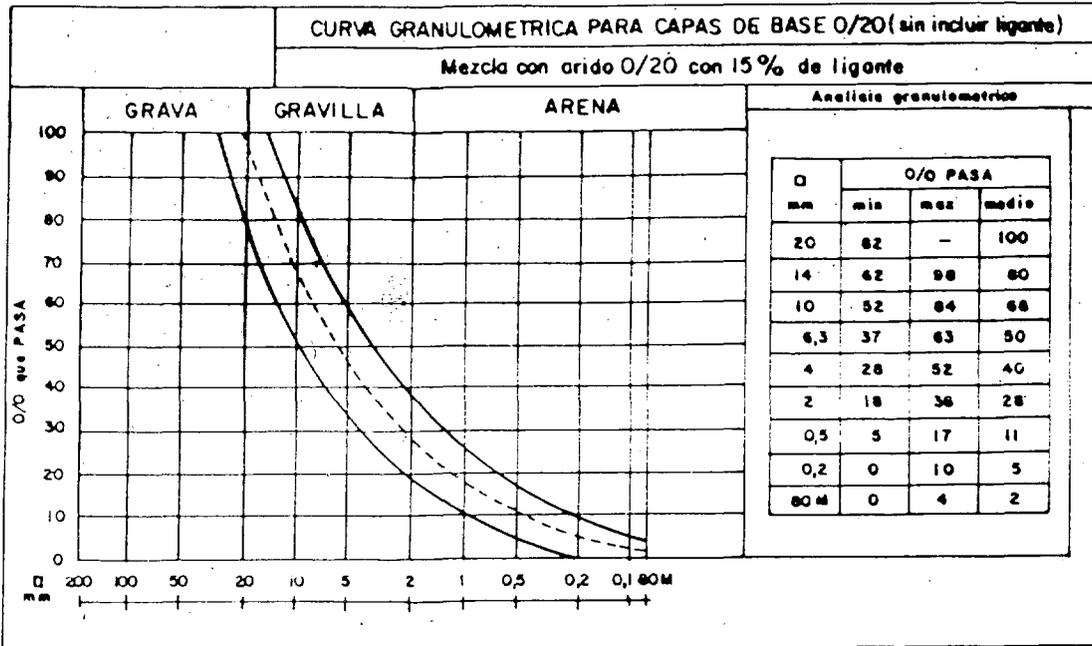
ción suficiente para que los granos de cemento no tengan mucho contacto, los productos de hidratación son de dimensiones coloidales; según avance la reacción los nuevos productos de hidratación entran en contacto, originándose un gel (es decir, un sistema disperso coherente, con propiedades mecánicas características de los sólidos en todo el sistema); ésta fase es el fraguado.

Transcurriendo más tiempo las partículas en-

tre los granos del clinker aumentan, haciéndose más compacta, hasta pasar a ser una masa de partículas en mutuo contacto.

El silicato tricálcico C_3S y el β -Silicato dicálcico $\beta-C_2S$ forman las tres cuartas partes en peso del cemento. El silicato tricálcico reacciona muy rápidamente con el agua, formando el gel antes citado denominado gel de tobermorita, fundamental en la trabajabilidad, fraguado y endurecimiento de la pasta. A la edad de un

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS



CAPA	GRAVA %	LIGANTE %			
		CENIZA VOLANTE	CAL APAGADA	CAL VIVA	TOTAL
SUB-BASE	90	8	2	—	10
	90	8,5	—	1,5	10
BASE	85	12	3	—	15
	85	12,7	—	2,3	15

Figura 13.—Recomendaciones francesas para el empleo de mezclas de grava-cenizas volantes-cal.

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

año la hidratación del silicato tricálcio prácticamente se completa según:

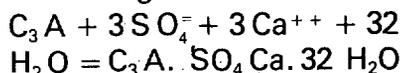


Mucho más lentamente se hidrata el silicato bicálcico, al parecer por tener una estructura mucho más empaquetada, no verificándose la reacción ni siquiera en varios años. Así, transcurridos cuatro años (con el 85 por 100 hidratado) la reacción es:



Los aluminatos de calcio se disuelven en agua y rápidamente reaccionan con ella. La adición de yeso, molido conjuntamente con el clinker, hará que la disolución sea más lenta, produciéndose compuestos más estables. Así pues, el agua con que se hidrata el cemento contendrá iones sulfato y portlandita (hidróxido cálcico). Las reacciones son:

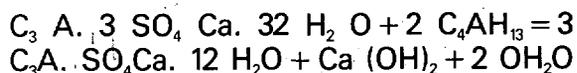
- Reacción del aluminato con los sulfatos (del yeso, produciéndose trisulfoaluminato cálcico etringita):



- Hidratación del aluminato restante en un medio básico, de hidróxido cálcico, produciéndose aluminato cálcico exagonal:



- Por último reaccionan la etringita y el aluminato exagonal resultando monosulfoaluminato cálcico:



En mezclas con puzolana se forma por reacción con la cal un silicato cálcico hidratado C S H, gel de tipo tobermorítico, si bien con una relación cal/silice distinta de 1,5 (que vimos era lo que sucedía en el cemento), disminuyendo el contenido de cal según se desarrolle la reacción puzolánica.

En la figura 12 hemos reproducido los esquemas que realizó J. Calleja para explicar la acción puzolánica.

Inicialmente la alita se encuentra en contacto con agua, transformándose una parte del cristal por acción del agua que lo circunda. Este proceso continúa así, apotando el cristal hacia el exterior, la cual formará en contacto con

Análisis Químico	Central Térmica			
	Compostilla (carbones ricos)	Soto de Ribera (carbones pobres)	Serchs (lignitos negros)	Meirama (lignitos pardos)
PF	9,10	4,30	2,40	2,30
Si O ₂	48,00	49,60	41,20	50,20
Al ₂ O ₃ ...	23,70	27,80	15,80	28,10
Fe ₂ O ₃	8,10	7,10	8,30	7,80
Ca O	2,20	2,40	25,00	2,90
Mg O	1,90	1,60	1,20	1,70
S O ₃	0,23	0,77	2,60	0,39
K ₂ O	4,00	4,20	1,90	4,20
Ha ₂ O ...	1,40	1,00	0,64	1,10
Ti O ₂	0,85	0,96	0,47	0,95
P ₂ O ₅	0,29	0,16	0,20	0,12
RI (I)	71,60	78,80	38,00	82,90
RI (II)	45,00	58,10	23,30	61,60
Ca O libre			8,30	
Componente Principal	Mullita	Mullita	Cuarzo	Sillimanita
Características Físicas				
Densidad Aparante (gr/cm ³)	0,931	0,816	1,000	0,674
Rechazo Tamices l/g				
900 mallas/cm ²	1,00	1,20	1,00	2,00
4900 mallas/cm ²	8,80	7,70	11,60	10,80
10000 mallas/cm ²	17,80	12,40	22,30	17,90
Diámetro predominante	45,50	31,40	46,90	45,20
Aspecto corpuscular	esferas	esferas	esferas	irregular

Figura 14. — Cenizas volantes empleadas en los ensayos del Instituto Eduardo Torroja.

el agua la portlandita primaria. Vemos como la alita se ataca de fuera hacia adentro, formándose en torno al cristal una capa de productos de la reacción que dificultan la total hidratación del grano.

3. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO Y TRABAJOS REALIZADOS POR EL INSTITUTO EDUARDO TORROJA

El Instituto Eduardo Torroja, por encargo de la Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL), ha realizado a lo largo de los últimos años diversos estudios sobre las cenizas volantes, su tipificación y sus aplicaciones.

En ese marco se procedió, en laboratorio, a estudiar las posibilidades de las mezclas ternarias grava-cenizas-cemento. Un equipo, dirigido por don Carlos Jofré, procedió a ajustar, teniendo en cuenta las recomendaciones francesas (Fig. 13) diversas dosificaciones en las que se analizó la posibilidad de sustituir el papel de la cal (comunmente utilizada en Francia y en Estados Unidos) por el del cemento. En el estudio se reflejó el abanico de cenizas existentes en el país a través de cuatro tipos, las de las centrales térmicas de Compostilla (Ponferrada, León; carbón rico), Soto de Ribera (Asturias; carbón pobre), Serchs (Barcelona; lignitos negros) y Meirama (La Coruña; lignitos pardos), representantes de todas las demás (Fig. 14).

Las diversas cenizas se mezclaban con cemento PA-350 (Portland con adiciones activas no superiores al 20 por 100; en éste caso puzolanas naturales), y alternativamente con cal apagada (porcentaje de óxido cálcico superior al 70 por 100). La mezcla se completaba con árido calizo, ajustado al uso recomendado para capas de base (Fig. 13).

Teniendo en cuenta que en las experiencias de otros países las relaciones cal-cenizas volante estaban entre 1:3 a 1:4, y que el total de la mezcla se situaba entre el 10 y el 15 por 100, y ya que la ceniza necesita una cal libre, que es inferior en el cemento que en la cal, se llegó a unos criterios de dosificación en los que el cemento se limitó a un máximo del 3 por 100.

El trabajo se desarrolló realizando, para cada una de las cenizas, las ocho mezclas que se reflejan en el cuadro de la figura 15.

Mezcla	Grava %	Ligante %			
		Ceniza Volante	Cal Apagada	Cemento	TOTAL
I	90	08,00	2,00	—	10
II	90	07,50	2,50	—	10
III	85	12,00	3,00	—	15
IV	85	11,25	3,75	—	15
I'	91	06,00	—	3,0	9
II'	90	07,50	—	2,5	10
III'	90	08,00	—	2,0	10
IV'	85	12,00	—	3,0	15

Figura 15.—Mezclas ensayadas en laboratorio por el Instituto Eduardo Torroja.

Dichas mezclas se amasaban con dos contenidos de agua, el óptimo del ensayo NLT 311/79, con martillo Kango, y el del mismo aumentado en 0,5 por 100. De cada una de las 64 mezclas diferentes (cuatro tipos de cenizas, ocho tipos de dosificaciones y dos humedades) se hicieron tres grupos de cuatro probetas (15 × 15 cms.), para romper a compresión simple a 7,28 y 90 días, y medir a la vez el módulo de elasticidad.

Los resultados de los ensayos se reflejan en la figura 16.

Las densidades de las mezclas con cemento oscilaron entre 2,24 y 2,33 T/m³, y las humedades óptimas entre 5,50 y 6,75 por 100; una excepción se presentó con las cenizas de Meirama que dieron menor densidad (2,00 a 2,16 T/m³) y más humedad (7,50 a 11,25 por 100).

Las mezclas con cal dieron menor densidad (2,09 a 2,28 T/m³) y más humedad (5,75 a 7,75 por 100); las de Meirama también discreparon.

De los resultados de los ensayos (Fig. 16) pueden extraerse las siguientes conclusiones:

a) Las mezclas con cemento dan unos resultados que superan los 35 Kp/cm²., exigidos para las bases de grava-cemento.

b) Las mezclas con cal dan resistencias menores que las de cemento, pero superiores a las obtenidas con grava-escoria, lo que las hace también aceptables.

c) Las resistencias a 90 días de las mezclas con cemento (hasta 213 Kp/cm². en la mezcla número 1, con cenizas de Soto de Ribera) son altas y superiores a las conseguidas con grava-cemento en el estudio del Laboratorio del Transporte (180 Kp/cm². con el 5 por 100 de cemento, y 95 Kp/cm² con el 3 por 100).

d) La resistencia de las probetas con cal a 90 días se aproxima a las de con cemento.

e) En las probetas con cal la variación del tipo de cenizas provoca oscilaciones de resistencias entre 1-1, 74-1, 98-3, 13, mientras que en el cemento la oscilación es más cerrada 1-0, 75-0, 91-0, 98 (Compostilla-Meirama-Soto de Ribera-Serchs).

f) La homogeneidad mejora al elevar el contenido de cemento del 2 al 3 por 100.

g) Un aumento de la humedad del 0,5 por

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

GRAVA-CENIZA-CEMENTO

RESISTENCIA A COMPRESION (kp/cm²) A DISTINTAS EDADES

(Valores medios de cada serie de 4 probetas cilíndricas Ø 15 h = 18 cm)

Ceniza Volante de las Centrales Térmicas de		COMPOSTILLA Ponferrada (León)				SERCHS (Barcelona)				SOTO DE RIBERA (Asturias)				MEIRAMA (Coruña)						
		DOSIFICACION			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS		
		nº	Arido	Ceniza		Cemento	Agua	7		28	90	Agua		7	28	90		Agua	7	28
I	91	6	3	5,75	70	104	208	5,75	94	141	189	5,75	101	134	213	7,50	70	111	156	
I-A				6,25	57	87	177	6,25	79	121	181	6,25	73	109	175	8,00	62	100	115	
II	90	7,5	2,5	5,75	65	95	125	5,50	83	141	194	5,50	68	111	155	8,50	64	81	110	
II-A				6,25	50	84	175	6,00	71	133	182	6,00	55	99	140	9,00	51	71	86	
III	90	8	2	5,75	52	83	143	5,50	75	133	175	5,75	48	86	110	8,75	54	70	78	
III-A				6,25	39	67	115	6,00	66	123	153	6,25	36	71	94	9,25	45	58	66	
IV	85	12	3	6,75	60	129	157	6,00	80	178	180	6,75	71	140	171	11,25	60	75	88	
IV-A				7,25	50	114	132	6,50	68	164	166	7,25	65	123	138	11,75	49	59	73	

GRAVA-CENIZA-CAL

RESISTENCIA A COMPRESION (kp/cm²) A DISTINTAS EDADES

(Valores medios de cada serie de 4 probetas cilíndricas Ø15 h = 18 cm)

Ceniza Volante de las Centrales Térmicas de		COMPOSTILLA Ponferrada (León)				SERCHS (Barcelona)				SOTO DE RIBERA (Asturias)				MEIRAMA (Coruña)						
		DOSIFICACION			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS			%	EDAD EN DIAS		
		nº	Arido	Ceniza		Cal	Agua	7		28	90	Agua		7	28	90		Agua	7	28
I	90	8	2	5,75	14	28	45	5,50	35	86	168	6,50	16	34	99	8,75	27	62	98	
I-A				6,25	10	18	44	6,00	27	18	143	7,00	12	26	85	9,25	24	54	86	
II	90	7,5	2,5	6,00	12	29	51	5,75	29	77	153	6,75	17	37	101	8,75	30	62	106	
II-A				6,50	10	25	48	6,25	25	71	141	7,25	11	28	84	9,25	26	55	86	
III	85	12	3	7,00	10	25	47	6,75	40	119	181	7,50	20	45	104	11,00	33	73	101	
III-A				7,50	8	25	41	7,25	32	112	172	8,00	16	38	95	11,50	28	64	96	
IV	85	11,25	3,75	7,25	15	25	61	7,00	38	111	166	7,75	20	42	121	11,50	32	65	93	
IV-A				7,75	11	21	53	7,50	30	103	155	8,25	15	40	95	12,00	26	56	87	

Figura 16.—Resultados de los ensayos realizados por el Instituto Eduardo Torroja con mezclas de grava-cenizas-cemento y gravas-cenizas-cal.

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

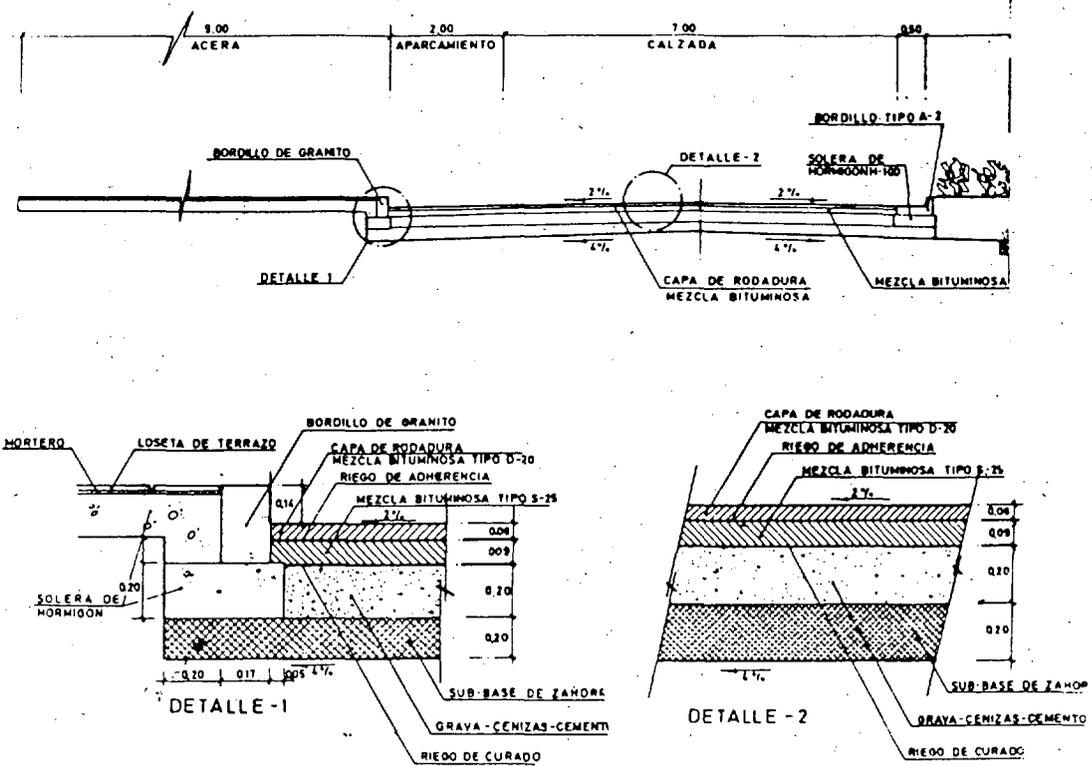
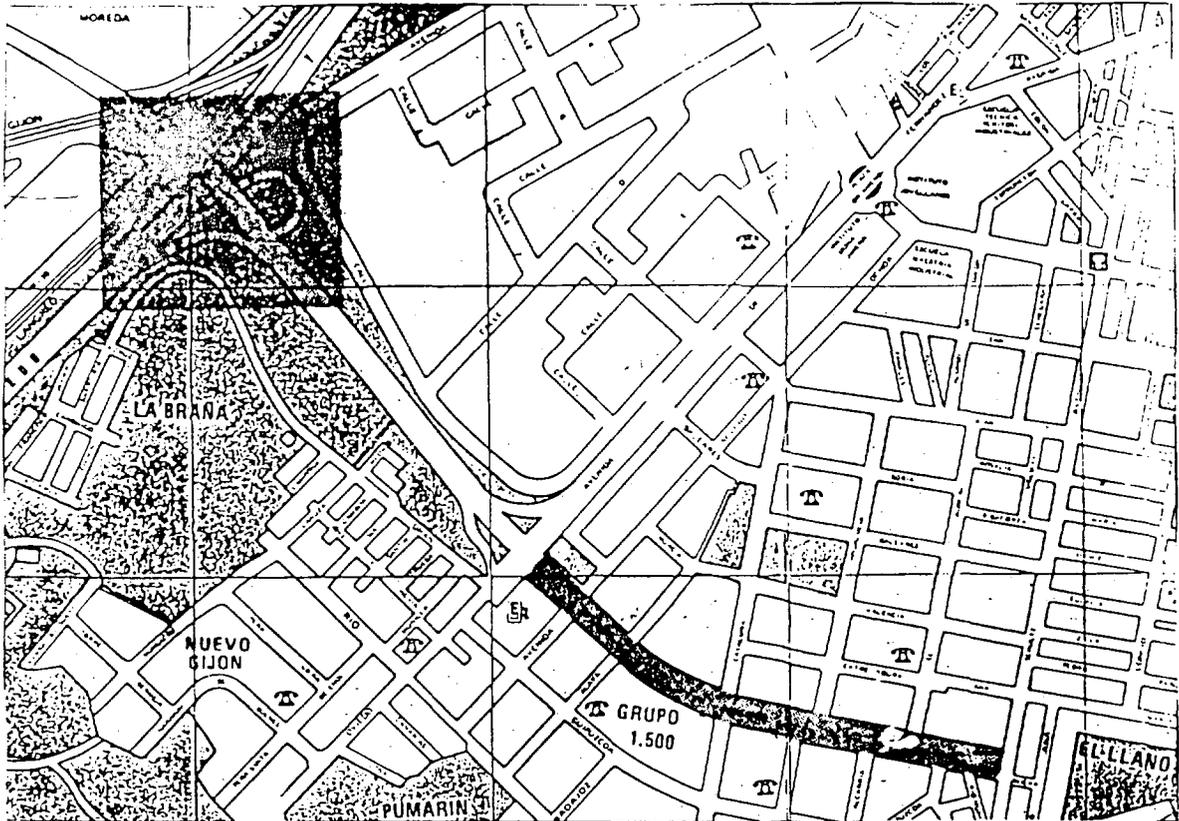
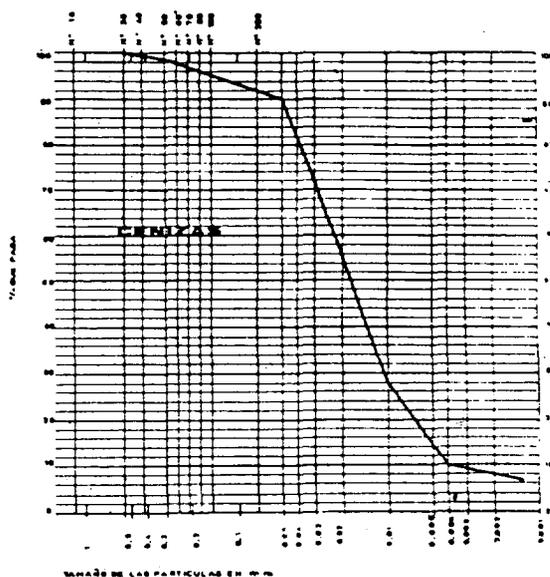


Figura 17.—Plano de situación y detalle de las obras realizadas en Gijón (Asturias) empleando grava-cenizas volantes-cemento en capa de base.

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

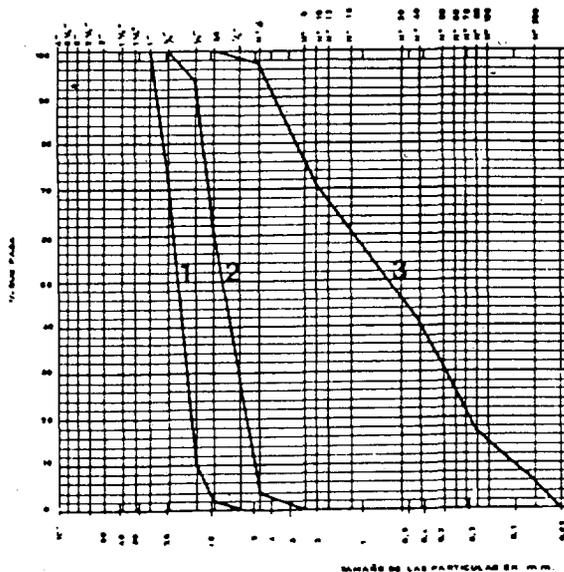
COMPONENTE	%
Pérdida al fuego	5,70
Residuo insoluble	0,35
Anhídrido silícico Si O ₂	46,80
Oxido aluminico Al ₂ O ₃	30,20
Oxido férrico Fe ₂ O ₃	8,50
Oxido cálcico Ca O	5,60
Oxido magnésico Mg O	2,10
Trióxido de azufre So ₃	0,40
Oxido de calcio libre	0,14

Características de las cenizas volantes de la Central Térmica de Aboño.



TAMIZ	mm.	% pasa		
		1	2	3
1"	25,400	100		
3/4"	19,100	73	100	
1/2"	12,700	10	94	
3/8"	9,500	2	61	100
1/4"	6,300	0	—	—
n.º 4 ..	4,760		4	97
n.º 8 ..	2,380		1	—
n.º 10 ..	2,000		0	71
n.º 40 ..	0,420			41
n.º 80 ..	0,177			17
n.º 200 ..			6	

Características de los síliceos de la cantera de El Estrellín, Avilés (muestras tomadas en los acopios a pie de obra el 5 de febrero del 85).



ENSAYO	Tipo de Cemento	
	P-350	P-450
Resistencia a compresión kg/cm ²		
2 días	—	197
3 días	201	260
7 días	316	461
28 días	463	560
Resistencia a flexotracción kg/cm ²		
2 días	—	47
3 días	48	55
7 días	66	87
28 días	88	96

	%	
	P-350	P-450
Contenido de clinker	74,0	
Contenido de adiciones silíceas	24,0	
Pérdida al fuego	1,9	0,6
Residuo insoluble	3,7	0,8

Características mecánicas Cementos del Cantábrico S. A. P-350 y P-450.

Figura 18.— Ensayos realizados para determinar las características de los materiales que serán empleados en obra.

100 produce una caída de resistencias del orden del 15 por 100.

h) Entre la resistencia a compresión simple y el módulo de elasticidad puede establecerse la correlación:

$$E = 30,4 \cdot C^{1,806}$$

En el Instituto Eduardo Torroja se analizó también la erosionabilidad (importante para firmes rígidos) de acuerdo con las recomendaciones francesas y a 7,28 y 90 días.

El índice de erosionabilidad osciló entre 0,07 y 0,35 a los 7 días para las mezclas con cemento; y entre 0,89 y 3,57 para las mezclas con cal, disminuyendo considerablemente a 28 y 90 días, dando valores muy similares a los de las mezclas con cemento.

4. DESCRIPCION DE LAS OBRAS

Conocidos los ensayos realizados por el Instituto Eduardo Torroja, los Ingenieros firmantes decidieron emplear una mezcla con cenizas volantes en una obra asturiana; situada cerca de una central térmica. Se eligió para ello la Urbanización de la Avenida de Federico Mayo, en Gijón, obra que consistía en:

- Acondicionamiento a distinto nivel de la intersección de la Ronda de Gijón con la Avenida de Fernández Ladreda (CN-630).
- Urbanización de la Avenida de Federico Mayo (Fig. 17).

Los motivos de la elección fueron, tanto la proximidad a la Central Térmica de Aboño, como la corta longitud del tramo.

La obra exigía la pavimentación de una sección tipo formada por (Fig. 17):

- Dos aceras de 5,00 m.
- Dos zonas ajardinadas de 4,00 m.
- Dos aparcamientos de 2,00 m.
- Dos por dos carriles de 3,50 m.
- Una mediana de 3,00 m.

El firme estaba proyectado formado por 0,20 m de grava-cemento y 0,15 m de aglomerado asfáltico en caliente, probándose la sustitución de la grava-cemento por el nuevo material.

El terreno sobre el que discurre la obra está for-

mado por un substrato rocoso del Jurásico-Lías, con dos unidades que se repiten sistemáticamente, la calcárea (calizas dolomíticas grisáceas y amarillentas) y la arcillosa (argilitas grises o negruzcas, blandas, con niveles de margas duras); sobre el substrato rocoso son rellenos artificiales y arcillas amarillentas plásticas.

Las obras fueron realizadas por Entrecanales y Tavora, S. A., comenzándose en junio de 1984 y finalizando en diciembre de 1985.

5. REDACCION DEL PROYECTO

En base a la información descrita en el apartado 3 y de la necesidad de utilizar, por motivos económicos, las cenizas de Aboño, y con el conocimiento de la documentación extranjera, se procedió a redactar el proyecto de firme, que se estructuró en dos fases; estudios previos y redacción del proyecto. Esta última se concretó en unos planos, en un pliego de prescripciones y en un presupuesto.

5.1. Estudios Previos

Antes de nada se procedió a la realización de los siguientes trabajos:

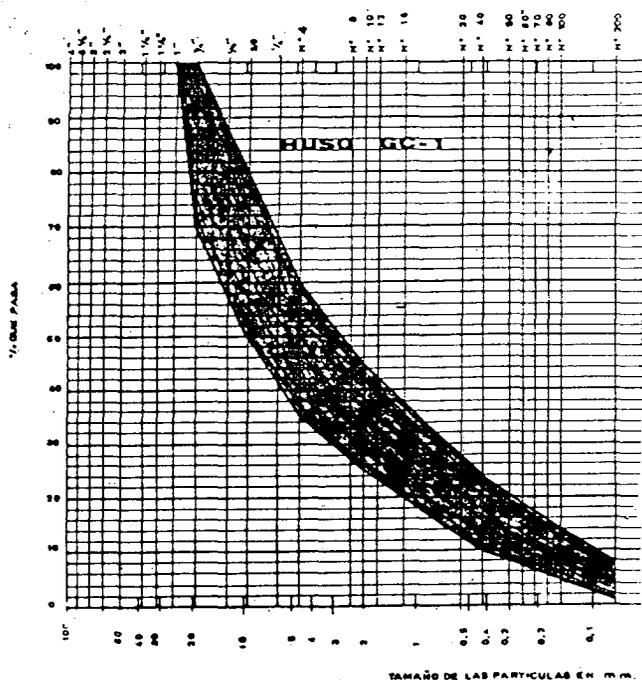
- a) Determinación de las propiedades físico-químicas de los materiales que forman parte de la mezcla (áridos, cenizas volantes y cemento).
- b) Determinación de la fórmula de trabajo.
- c) Obtención de resistencias y análisis de los ensayos previos.
- d) Otros ensayos.

5.1.a Determinación de las propiedades físico-químicas de los materiales que forman parte de la mezcla.

Inicialmente se pensó en hacer la mezcla de cenizas-cemento en la planta instalada en obra, calibrándola para hacer la mezcla partiendo de sus componentes por separado, empleándose los siguientes materiales (Fig. 18):

- Cemento PA-350 (Portland con adiciones activas) ó P-450 (Portland); los ensayos determinarían cual de los dos cementos sería el adecuado.
- Cenizas volantes de la Central Térmica de

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS



TAMIZ mm.	% pasa	
	máx.	mín.
25,000	100	—
20,000	100	70
10,000	80	50
5,000	60	35
2,000	45	25
0,400	24	10
0,080	8	1

Figura 19. — Huso granulométrico GC-1 según el artículo 513 del PG-3 (correspondiente a mezclas de grava-cemento para tráfico medio o pesado).

Aboño, próxima al lugar donde se realizarían las obras; éstas cenizas tienen una composición muy parecida a las de la Central de Soto de Ribera, que ya fueron empleadas en los ensayos que realizó el Instituto Eduardo Torroja.

- Arido silíceo de machaqueo procedente de bolos extraídos de la cantera de El Estrellín, en Avilés (Asturias).

5.1.b Determinación de la fórmula de trabajo.

Con las tres fracciones indicadas del árido se adaptó la curva granulométrica al huso GC-1 (Fig. 19), que se pensaba emplear en obra.

Se ensayaron seis mezclas diferentes (Fig. 20), obteniendo para cada una la humedad y

densidad (Proctor Modificado), así como las resistencias a compresión simple a 7 días, y para las mezclas 3 y 5 también a 28, 90 y 180 días.

De los resultados de éstos ensayos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las mezclas 1, 2 y 4 contienen el 3 por 100 de cemento, por lo que su empleo no supondrá ahorro respecto a una mezcla tradicional de grava-cemento.
- De las tres mezclas restantes (las 3, 5, y 6) la más cara es la 6 (es el 43 por 100 más cara que la 3, y el 55 por 100 más que la 5), con un contenido de P-450 del 2,5 por 100.
- La número 5, con el 1,5 por 100 de cemento P-450 y el 8,5 por 100 de cenizas volantes, si bien daba resistencias suficientes a compresión simple, decidió no emplearse, ya que con las plantas de fabricación disponibles en el mercado (dosificación volumétrica y obsoletas) no puede asegurarse una homogeneidad en la proporción de aglomerante, con la consecuencia de que una probable disminución (aún pequeña) en el contenido, ya bajo, de cemento haría descender de forma notable las resistencias.

Por ello se decidió emplear la mezcla número 3.

5.1.c Obtención de resistencias y análisis de los ensayos previos.

Con la mezcla número 3 elegida (2 por 100 de cemento PA-350, 8 por 100 de cenizas volantes y 90 por 100 de áridos) se obtuvieron las resistencias siguientes:

	Resist. a comp. simple kg/cm ²			
	7 días	28 días	90 días	180 días
	68,90	164,00	185,00	196,00
	61,00	172,00	174,00	213,00
	65,70	176,00	180,00	202,00
	72,20	166,00	180,00	205,00
Media	66,95	169,50	179,75	204,00

5.1.d Otros ensayos.

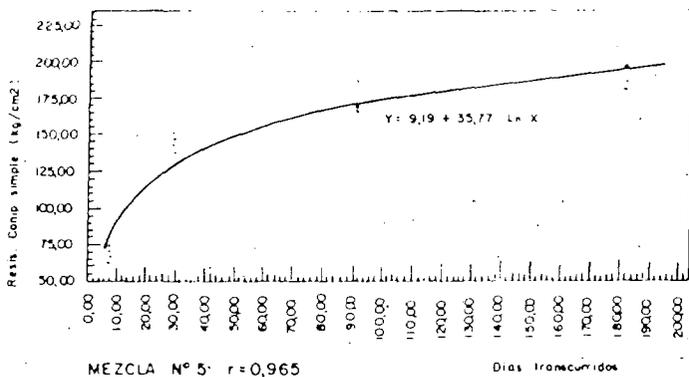
Para conocer la influencia de la dosificación separada de ceniza y del cemento se procedió

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

	COMPOSICION MEZCLA			PROCTOR MODIFICADO		RESISTENCIA A COMPRESION SIMPLE kg/cm ² .				IMPORTE DEL AGLOMERADO PTA/T.
	Cen. %	Cemento %	Clase	Humedad %	Densid.	7 días	28 días	90 días	180 días	
1	0,0	3,0	PA-350	6,10	2,17	59,50 72,20 58,30 57,90				503
2	0,0	3,0	P-450	5,80	2,16	59,90 59,60 65,00 65,50				599
3	6,0	2,0	PA-350	6,00	2,18	68,90 61,00 65,70 72,20	164,00 172,00 176,00 166,00	185,00 174,00 180,00 180,00	196,00 213,00 202,00 205,00	383
4	5,0	3,0	PA-350	6,20	2,17	85,40 96,50 78,90 89,50				538
5	3,5	1,5	P-450	5,90	2,19	71,20 73,90 65,00 66,20	147,00 150,00 138,00 143,00	187,00 168,00 166,00 169,00	196,00 181,00 187,00 181,00	352
6	7,5	2,5	P-450	6,50	2,18	82,00 84,00 77,90 78,00				548

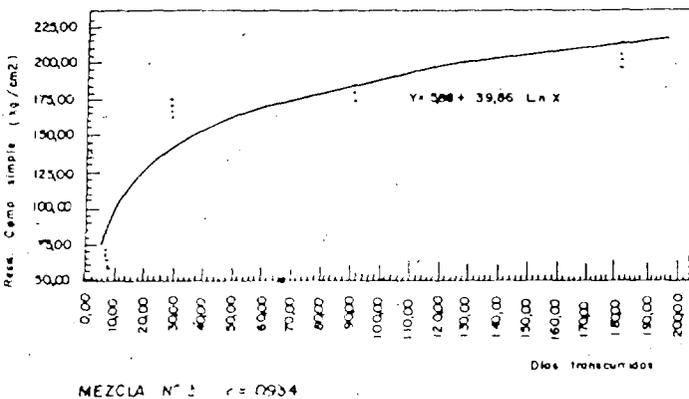
Proctor Modificado con molde de 2,318 l.

Precios Julio 1984 del total de aglomerante empleado por tonelada de mezcla



Mezcla: 90 % áridos
8 % cenizas volantes
2 % clinker de cemento

Número	Edad días	Frexotracción kg/cm ²	Compresión kg/cm ²
1	9	17,00	81,00
2	9	15,00	78,00
3	28	31,00	95,00
4	28	28,00	88,00
5	60	32,00	95,00
6	60	26,00	88,00



Mezcla: 90 % áridos.
10 % aglomerante (molienda conjunta de las cenizas volantes con clinker de cemento, en proporción 4/1).

Número	Edad días	Frexotracción kg/cm ²	Compresión kg/cm ²
1'	9	11,50	78,00
2'	9	13,00	69,00
3'	28	22,00	82,00
4'	28	23,50	75,00
5'	60	25,00	88,00
6'	60	23,00	110,00

Figura 20.— Ensayos realizados con diferentes mezclas para determinar la composición a emplear en obra.

Figura 21.— Ensayos realizados para evaluar la influencia de la molienda conjunta de las cenizas volantes y el clinker de cemento.

a cuantificar la mezcla, según se hiciese la misma con o sin molienda conjunta de las cenizas volantes y el clinker de cemento, para ello se elaboraron probetas normalizadas de mortero, de $16 \times 4 \times 4$ cms., con los dos tipos de mezclas (con y sin molienda conjunta) para romper a flexotracción y compresión (Fig. 21).

Los resultados del ensayo mostraron que había muy pocas diferencias entre los dos tipos de mezclas, por lo que en casos similares (con las cenizas volantes de carbones pulverizados) parece que el sobrecosto que ocasiona la molienda conjunta de cemento y cenizas no está justificado, pues no se producen las mejoras correspondientes a dicho sobrecosto.

Otro aspecto diferente sería el de la variación de la resistencia de la mezcla al haber un molido muy intenso de las cenizas. En la figura 8 se indicó como aumentar la finura de las cenizas con la molienda. En el caso de mezclas de cemento P-350 (80 por 100) y cenizas volantes (20 por 100) con diferente finura las resistencias varían según se indica en la figura 22, que da a entender asimismo que la mejora no es muy significativa, lo que coincide con la creciente opinión de algunos autores acerca de que en clinker molidos a finura creciente en molinos de laboratorio, las resistencias mecánicas se detienen al alcanzarse superficies Blaine de unos $5.500 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

5.2 Proyecto

A la vista de los resultados de los ensayos se vió como posible la obra, procediéndose a redactar el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, en base a los conocimientos derivados del PG. 3-1975, de nuestra experiencia con la grava-escoria, el tipo de mezcla y los equipos de fabricación, extendido y compactación así como las características del producto terminado.

Tiempo de molienda de la ceniza	Resistencia a compresión simple kg/cm^2					
	2 d.	3 d.	7 d.	28 d.	50 d.	365 d.
Sin moler	128	161	271	461	530	621
30 min.	130	166	286	492	561	643
1 h.	134	171	300	510	602	688
2 h.	149	184	327	551	633	662

Figura 22.—Variación de la resistencia a compresión simple con la finura de las cenizas volantes.

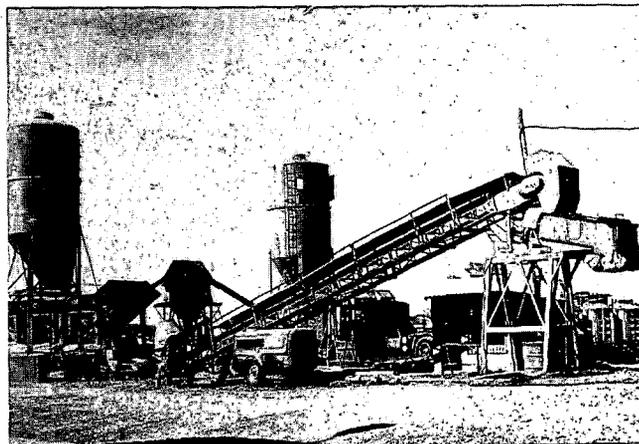


Figura 23.—Planta tradicional de grava-cemento empleada en obra.

Planta continua de 150 T/h. de producción, compuesta por: 3 tolvas para áridos, de 7 m^3 cada una, con cintas dosificadas de 2 CV.

1 cinta transportadora para el árido, de 10 m y motor de 3 CV. 2 silos para la mezcla cenizas volantes-cemento, de 25 T. cada silo, con detector indicador de nivel mínimo.

2 tornillos de Arquímedes para salida de los anteriores silos. 1 dosificador regulable de mezcla cenizas volantes-cemento, con tolva reguladora de 2 m^3 .

1 cinta transportadora para alimentación a la mezcladora, de 20 m y motor de 10 CV.

1 mezclador de doble eje con motor de 30 CV, con un cuadro para el agua.

Cuadro de mandos y dispositivos de seguridad.

En los planos se definía la sección transversal y los espesores de las diversas capas (Fig. 17).

6. REALIZACION DE LAS OBRAS

Aprobado el proyecto se procedió a planificar la obra. Las materias primas, los equipos de extendido y compactación obedecían a lo esperado, pero se plantearon serias dudas acerca de la planta (una convencional de gravacemento de 150 T/h.) de fabricación de la mezcla (Fig. 23), de la fiabilidad de una dosificación volumétrica de la ceniza (por cinta) y del cemento (por tornillo sin-fin).

La realización de diversos ensayos de fabricación nos convenció, tanto de la dificultad de conseguir un 8 por 100 de cenizas, como de la utopía de tener con un tornillo sin-fin el 2 por 100 de cemento. Por ello, y dado al interés que se tenía en una precisión suficiente, se rogó a

Cementos del Cantábrico la fabricación de una mezcla de cenizas y clinker (molidos conjuntamente) en proporción 4:1, mezcla que fue empleada en obra.

De este modo se realizó la fabricación con la planta ya mencionada (cuyas características se describen en la figura 23), ajustada para trabajar con un 90 por 100 de áridos y un 10 por 100 de aglomerante (clinker-cenizas 1:4) y con un 5,5 por 100 de humedad. Ajuste que sólo se modificó en dos tramos de prueba, en uno de los cuales se bajó el ligante al 5 por 100 y en otro se elevó al 18 por 100.

El transporte desde la planta, con un recorrido de 1 km., se hizo con camiones basculantes (4 unidades), no detectándose ni segregaciones ni pérdidas de humedad.

El extendido se realizó con una motoniveladora Frisch F-115 (Fig. 24), logrando un correcto rasanteo con rendimientos aceptables.

La compactación se realizó con un rodillo vibrante Rahile-120, de 12.660 Kg. de peso total, no presentándose problema alguno, alcanzándose con normalidad los resultados previstos.

El curado se hacía mediante riego, una vez hecha la compactación, con una emulsión ECR-1 que se extendía con un distribuidor de ligante tradicional. No hubo fisuraciones anormales, aunque conviene hacer constar que dada la humedad del ambiente y el clima Atlántico de Gijón no es sorprendente.



Figura 24.—Maquinaria empleada en el extendido.

7. ENSAYOS REALIZADOS

Antes del comienzo de los trabajos se realizaron los ensayos previos, que ya fueron descritos anteriormente. Ya en el transcurso de las obras se realizaron los siguientes:

1. Control de la fabricación de la mezcla.
2. Control del extendido y compactación.
3. Medida de resistencias.
4. Control topográfico.

7.1. Control de la fabricación de la mezcla.

7.1.a Control del conglomerante

Como ya se señaló anteriormente, con la planta instalada a pie de obra no había garantía de calidad en cuanto a la dosificación por separado del cemento (clinker, 2,00 por 100) y cenizas volantes (8,00 por 100).

Se recurrió a hacer un mezclado previo de esos componentes (en proporción 4/1), de forma que en obra se haría la mezcla del árido y de ese conglomerante.

La cementera (Cementos del Cantábrico, S. A.), dosificando en peso molía conjuntamente las cenizas volantes y el clinker de cemento, logrando así un conglomerante homogéneo y correctamente dosificado. Se enviaron lotes diarios al Laboratorio del C.E.A.T. de Oviedo para su análisis, obteniendo resultados satisfactorios.

7.1.b Ensayos sobre los áridos

Diariamente se hicieron, al menos, dos ensayos granulométricos, uno por la mañana y otro por la tarde, de esta forma la granulometría del árido se mantenía dentro del huso deseado (Figs. 18 y 19).

Se realizaron, a través del Laboratorio del C.E.A.T., controles de las restantes características de los áridos (desgaste y caras de fractura).

7.1.c Determinación del contenido de aglomerante y humedad de la mezcla

En la fabricación de la mezcla, con la planta instalada en obra, se controló continuamente tanto el contenido de aglomerante como la humedad, de éste modo, además de conocer en todo momento las características de la mezcla se obtuvo información sobre el funcionamien-

EMPLEO DE CENIZAS VOLANTES EN CAPAS DE BASE DE FIRMES DE CARRETERAS

Num	Fecha 1.985	Aglom. x	Humed. x	Densi	C. simp 7 d.	C. simp 28 d.
1	21-Enero	6.60	2.22	46.00		
2		6.60	2.25	26.00		
3		6.60	2.24	50.00		
4		6.60	2.40	57.00		
5		6.60	2.38	69.00		
6		6.60	2.38	71.00		
7	29-Enero	5.80	2.30	31.00		
8		11.00	5.80	44.50		
9		11.00	5.80	43.60		
10	30-Enero	12.00	4.50	2.18		
11		12.00	4.50	2.18		
12		12.00	4.50	2.13		
13	31-Enero	14.00	5.60	2.23	54.50	
14		14.00	5.60	2.20		
15		11.30	4.50	2.30	56.00	
16		11.30	4.50	2.16		
17		16.00	6.20	2.16	28.50	
18		16.00	6.20	2.15		
19		17.00	6.10	2.13	29.00	
20		17.00	6.10	2.14		
21	1-Febr.	16.50	5.30	2.18		
22		16.50	5.30	2.18		
23		16.50	5.30	2.25	56.00	
24		16.50	5.30	2.25		
25	4-Febr.	8.60	4.90	2.27	31.80	
26		8.60	4.90	2.30		
27		10.00	5.70	2.32	43.50	
28		10.00	5.70	2.32		
29		9.50	5.50	2.25	74.5	
30		9.50	5.50	2.25	103.00	
31	6-Febr.	13.00	6.00	2.31	53.70	
32		13.00	6.00	2.36		
33	7-Febr.	10.00	5.70	2.20	26.00	
34		10.00	5.70	2.18		
35		11.40	6.10	2.32	37.60	
36		11.40	6.10	2.35		
37		16.30	6.20	2.26	69.40	
38		16.30	6.20	2.32	169.00	
39		11.00	5.10	2.27	27.20	
40		11.00	5.10	2.31		
41	8-Febr.	10.50	6.00	2.33	38.50	
42		10.50	6.00	2.29		
43	13-Febr.	9.00	5.50	2.30	36.00	
44		9.00	5.50	2.31		
45		8.00	6.00	2.36	69.00	
46		8.00	6.00	2.30	90.00	
47		8.00	5.90	2.26	33.00	
48	15-Febr.	8.00	5.90	2.27		
49		7.50	5.80	2.32	41.00	
50		7.50	5.80	2.29		
51		11.00	6.20	2.36	58.40	
52		11.00	6.20	2.32		
53		10.50	5.50	2.32		
54		10.50	5.50	2.32		
55	20-Febr.	12.40	6.30	2.38	51.90	
56		12.40	6.30	2.36		
57		9.00	6.50	2.32	42.70	
58		9.00	6.50	2.32		
59		9.75	5.80	2.30	37.60	
60		9.75	5.80	2.28	37.20	
61		12.00	5.70	2.25		
62		12.00	5.70	2.25		
63	21-Febr.	11.00	5.60	2.37	76.00	
64		11.00	5.60	2.33		
65		12.00	6.30	2.33	101.00	
66		12.00	6.30	2.33		
67	22-Febr.	13.20	6.00	2.38	164.00	
68		13.20	6.00	2.38		
69		11.60	6.20	2.39	141.00	
70		11.60	6.20	2.35		
71		11.50	5.60	2.37	54.00	
72		11.50	5.60	2.37		
73	25-Febr.	11.00	5.50	2.30	61.20	
74		11.00	5.50	2.28		
75		10.00	5.90	2.36	63.50	
76		10.00	5.90	2.35		
77	26-Febr.	11.00	5.80	2.32	96.00	
78		11.00	5.80	2.36		
79	2-Abril	9.00	5.00	2.30		
80		9.00	5.00	2.34		
81	3-Abril	9.00	6.60	2.36		
82		9.00	6.60	2.36		
83		9.00	6.10	2.31		
84		9.00	6.10	2.31		
85	10-Abril	10.00	5.80	2.37	46.00	
86		10.00	5.80	2.37		
87		13.00	5.00	2.28	37.00	
88		13.00	5.00	2.23	51.00	
89	11-Abril	11.00	5.10	2.31		
90		11.00	5.10	2.29		
91		11.00	5.40	2.30		
92		11.00	5.40	2.30		
93	12-Abril	11.00	5.10	2.32	34.00	
94		11.00	5.10	2.32	52.00	
95		12.00	5.00	2.27		
96		12.00	5.00	2.26	45.00	
97	19-Abril	11.00	6.00	2.30		
98		11.00	6.00	2.38		
99		10.50	6.70	2.47		
100		10.50	6.70	2.42		
101	25-Abril	12.00	6.40	2.27		
102		12.00	6.40	2.27		
103	30-Abril	12.00	4.80	2.28		
104		12.00	4.80	2.28		
105		9.00	5.30	2.32		
106		9.00	5.30	2.31		
107		12.00	5.90	2.29		
108		12.00	5.90	2.28		
109	10-Mayo	11.40	5.80	2.32		
110		11.40	5.80	2.37		
111	17-Mayo	13.00	6.10	2.26		
112		13.00	6.10	2.26		
113	12-Junio	11.00	5.20	2.24		
114		11.00	5.20	2.24		
115		11.00	5.20	2.24		
116		11.00	5.20	2.24		
117	14-Junio	11.00	5.90	2.24		
118		11.00	5.90	2.19		
119		11.00	5.90	2.23		
120		11.00	5.90	2.32		
121	18-Junio	9.00	6.10	2.24		
122		9.00	6.10	2.30		
123	2-Agos.	10.40	5.60	2.34		
124		10.40	5.60	2.32		
125	9-Agos.	12.00	5.50	2.25		
126		12.00	5.50	2.24		
127		12.00	5.30	2.27		
128		12.00	5.30	2.30		
129		12.00	5.50	2.28		
130		12.00	5.50	2.28		
131	21-Agos.	13.00	6.70	2.20		
132		13.00	6.70	2.22		
133		13.00	6.70	2.22		
134		13.00	6.70	2.20		
135	12-Sept.	11.00	5.60	2.26		
136		11.00	5.60	2.23		
137		11.00	5.60	2.24		
138		11.00	5.60	2.20		
139	13-Sept.	13.00	6.40	2.22		
140		13.00	6.40	2.21		
141		13.00	6.40	2.17		
142		13.00	6.40	2.20		
143	17-Sept.	12.00	5.30	2.23		
144		12.00	5.30	2.14		
145		12.00	5.30	2.21		
146		12.00	5.30	2.16		
147	18-Sept.	10.00	5.30	2.16		
148		10.00	5.30	2.20		
149		10.00	5.30	2.16		
150		10.00	5.30	2.17		
151		10.00	5.30	2.17		
152		10.00	5.30	2.17		
153		10.00	5.30	2.17		
154		10.00	5.30	2.17		
155		10.00	5.30	2.17		
156		10.00	5.30	2.17		
157		10.00	5.30	2.17		
158		10.00	5.30	2.17		
159		10.00	5.30	2.17		
160		10.00	5.30	2.17		
161		10.00	5.30	2.17		
162		10.00	5.30	2.17		
163		10.00	5.30	2.17		
164		10.00	5.30	2.17		
165		10.00	5.30	2.17		
166		10.00	5.30	2.17		
167		10.00	5.30	2.17		
168		10.00	5.30	2.17		
169		10.00	5.30	2.17		
170		10.00	5.30	2.17		
171		10.00	5.30	2.17		
172		10.00	5.30	2.17		
173		10.00	5.30	2.17		
174		10.00	5.30	2.17		
175		10.00	5.30	2.17		
176		10.00	5.30	2.17		
177		10.00	5.30	2.17		
178		10.00	5.30	2.17		
179		10.00	5.30	2.17		
180		10.00	5.30	2.17		
181		10.00	5.30	2.17		
182		10.00	5.30	2.17		
183		10.00	5.30	2.17		
184		10.00	5.30	2.17		
185		10.00	5.30	2.17		
186		10.00	5.30	2.17		
187		10.00	5.30	2.17		
188		10.00	5.30	2.17		
189		10.00	5.30	2.17		
190		10.00	5.30	2.17		
191		10.00	5.30	2.17		
192		10.00	5.30	2.17		
193		10.00	5.30	2.17		
194		10.00	5.30	2.17		
195		10.00	5.30	2.17		
196		10.00	5.30	2.17		
197		10.00	5.30	2.17		
198		10.00	5.30	2.17		
199		10.00	5.30	2.17		
200		10.00	5.30	2.17		

Figura 25.— Resultados de los ensayos realizados en obra con la mezcla de 90 por 100 de grava; 8 por 100 de cenizas volantes y 2 por 100 de clinker de cemento.

to de éste tipo de plantas. El control del contenido de aglomerante (mezcla de cenizas volantes y clinker de cemento, en proporción 4/1) se hizo midiendo el rechazo por el tamiz A.S.T.M. n.º 200 (0,074 mm.), deduciendo la parte correspondiente al árido se obtenía la proporción de aglomerante que tenían las diferentes amasadas. De esas mismas amasadas se tomaba otra muestra en el extendido, determinándose la humedad y elaborándose probetas para romper, a 7 y 28 días, a compresión simple.

Estos dos ensayos (tamizado y humedad) se hicieron tomando una muestra de cada 35 T. de mezcla. Al ser ensayos de rápida ejecución permitían hacer los ajustes necesarios de la planta, sin necesidad de tener que afectar la marcha de las obras.

Los resultados de los ensayos se indican en la figura 25.

7.1.d Estudio sobre la precisión de la planta

La planta para la fabricación de la mezcla (Fig. 23) fue ajustada para trabajar con las siguientes proporciones:

- 90 por 100 de árido.
- 10 por 100 de aglomerante (formado por una mezcla de cenizas volantes clinker de cemento Portland, en proporción 4/1).
- 5,5 % de humedad.

En la figura 26 se pone de manifiesto las irregularidades observadas en el funcionamiento de la planta, lo que ratifica la necesidad antes citada de renovar el actual parque de plantas de este tipo, y mucho más si se pretenden hacer mezclas con menores contenidos de aglomerantes (gravas-cemento, con el 3 por 100 de aglomerante).

7.2. Control del extendido y compactación

7.2.a Control de posibles segregaciones y variación de la humedad en el transporte

En el extendido se tomaron muestras periódicamente para controlar el contenido de humedad (muestras con las que se realizaban probetas para romper a compresión simple). La presencia constante de dos operarios especializados, uno en la planta y otro en el lugar de extendido, haciendo ensayos con dos muestras de

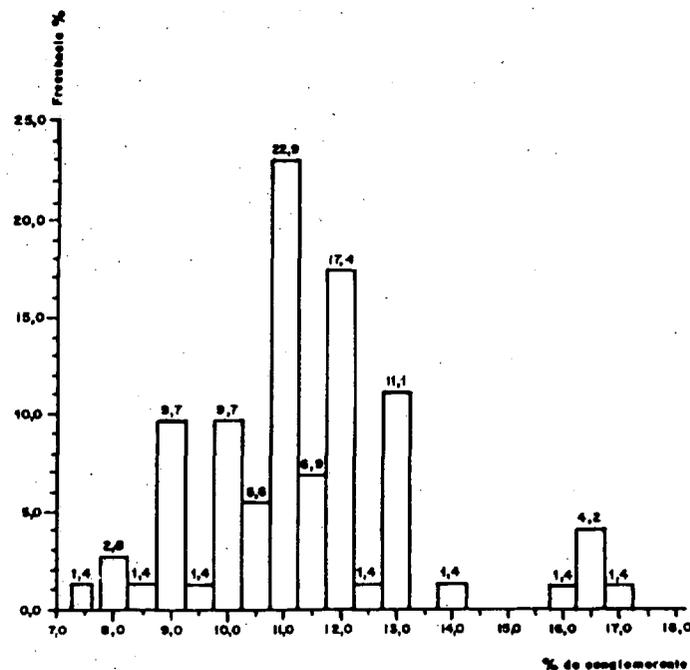
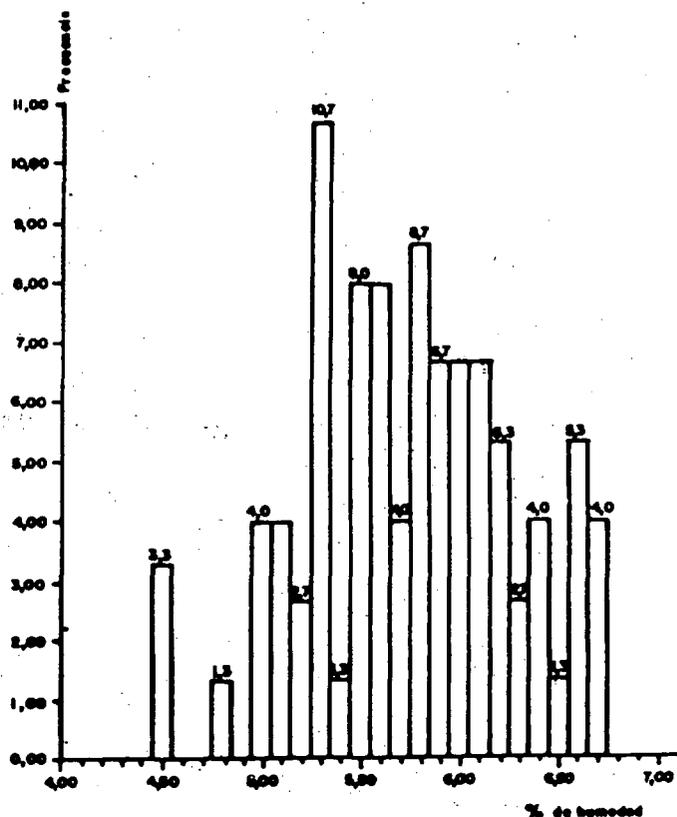


Figura 26.—Variaciones observadas en la mezcla realizada con la planta instalada en obra. 90 por 100 de grava y 10 por 100 de aglomerante (formado por una mezcla de cenizas volantes-clinker).

una misma amasada tomadas en esos dos lugares (planta y extendido), confirmaron que el transporte no ejercía influencia alguna, ni en la variación de la humedad, ni en posibles segregaciones.

7.2.b *Ensayos de compactación en el extendido*

Al comienzo de las obras se procedió, en un tramo de ensayo, a determinar la energía de compactación necesaria con la maquinaria disponible en obra. Para ello se extendió la mezcla (20 cms) compactándose con el rodillo vibrante que sería empleado (Fig. 24), obteniéndose que con el 5,5 por 100 de humedad y 10 pasadas (5 dobles) se obtenía una densidad ligeramente superior al 100 por 100 Proctor Modificado. Un mayor número de pasadas no producía un aumento de densidad que justificara su coste adicional.

A lo largo de la obra se comprobaba sistemáticamente, por medio de un vigilante, el número de pasadas y se realizaban controles de densidad. Los resultados (Fig. 25) fueron satisfactorios.

7.2.c *Otros ensayos en el extendido*

Si bien el extendido de la mezcla con motoniveladora dejaba una superficie final correctamente rasanteada, en un tramo experimental (Fig. 27) se procedió a ensayar un posible sistema de reperfilado; se extendió la capa con mayor espesor, de forma que al dar el 70 por 100 de la energía total de compactación (o lo que es igual, 7 pasadas) quedara un espesor de 3 cms. superior al definitivo de la capa (20 cms.);



Figura 27.—Tramo en el que ensayó un reperfilado para obtener un mejor rasanteo.

seguidamente se procedía al perfilado con la motoniveladora, eliminando esos 3 cms. superiores, terminando de dar la energía de compactación restante (3 pasadas) para el acabado superficial.

Este ensayo dió resultados negativos pues al proceder al perfilado con la motoniveladora ésta eliminó, tanto los 3 cms. en exceso, como mucho material que quedó adherido o trabado al superior, resultando al final una superficie inaceptable.

Otra de las posibles alternativas para corregir un tramo mal rasanteado es proceder al escarificado y reperfilado de la mezcla, siempre que desde la fabricación de la amasada no transcurra un tiempo superior al de inicio de fraguado.

En el Laboratorio a pie de obra tratamos de cuantificar por métodos indirectos este intervalo de tiempo. Así se hizo una amasada, que fue conservada a humedad constante; transcurridas 2, 4 y 5 horas se elaboran probetas, con remasado previo, para romper a compresión simple (a 28 días). Hasta las 2 horas no se observan diferencias en las resistencias (respecto a las que se obtienen de las probetas elaboradas inmediatamente tras la amasada).

Desde las 2 horas y hasta las 5 horas las resistencias decaen del orden del 20 por 100 por cada hora transcurrida.

Queremos destacar que los resultados de éstos ensayos deben de ser considerados tan sólo como base para una posible investigación en un Laboratorio con medios adecuados.

7.3. **Medida de Resistencias**

7.3.a *Resistencias a compresión simple medida sobre probetas realizadas en obra.*

En el extendido de la mezcla se tomaron muestras con las que se hicieron probetas normalizadas (Fig. 28), compactadas con martillo vibrante (según la NLT-310/79).

De los valores de las resistencias a 7 y 28 días (que ya se indicaron en la Fig. 25) podemos deducir los siguientes datos:

- Resistencia a 7 días valor medio 52,22 Kg/cm².



Figura 28.— Probetas realizadas en el extendido para romper a compresión simple a 7 y 28 días (molde Proctor Modificado, sin espaciador).

— Resistencia a 28 días valor medio 83,98 Kg/cm².

No ha sido posible establecer una correlación correcta entre el porcentaje de aglomerante de la mezcla (formado por cenizas volantes y clínker de cemento en proporción 4/1) y las resistencias a compresión simple (Fig. 29).

Ya hemos indicado los resultados de los ensayos al variar el contenido de aglomerante (5 por 100, 10 por 100 y 18 por 100) en porcentajes importantes; pensamos que podían estudiarse en Laboratorio mezclas mucho más afinadas, con variaciones del aglomerante menores.

7.3.b Resistencias a compresión simple medida sobre testigos extraídos por rotación.

De la mezcla ya endurecida, y a diferentes

edades, se extrajeron testigos de \varnothing 10 cms. (Fig. 30) para romper a compresión simple.

7.3.c Ensayos de mezclas con diferentes contenidos de aglomerante.

Con el propósito de obtener alguna información adicional con respecto a la influencia que pudiera tener el contenido de aglomerante, se hicieron ensayos con muestras con el 5 por 100 y el 18 por 100 de aglomerante (formado por cenizas-cemento en proporción 4:1), indicándose los resultados en la figura 31.

7.4 Control Topográfico

Por topografía clásica se controló las secciones de cada perfil así como longitudinalmente, obteniéndose una rasante satisfactoria.

8. CONCLUSIONES

8.1. Buen comportamiento de la mezcla

La más importante, y positiva, conclusión estriba en el buen comportamiento general del

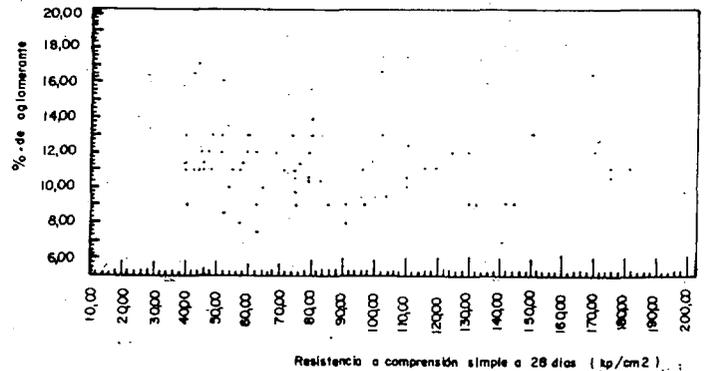
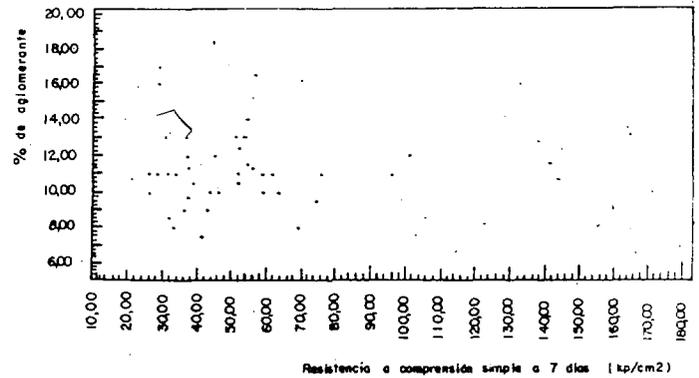
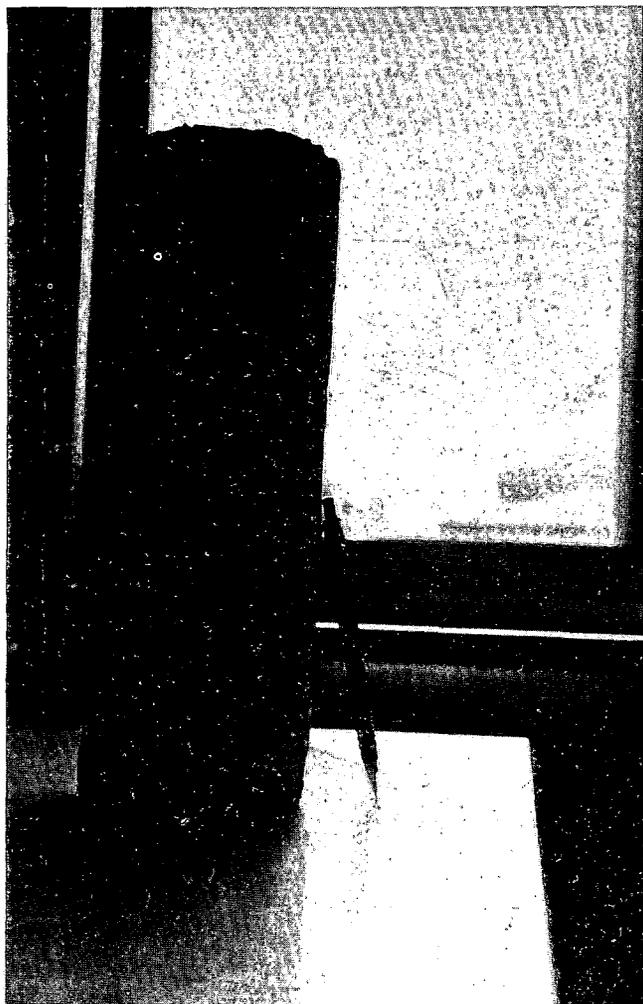


Figura 29.—Resultados de los ensayos realizados en obra.



Núm.	Fecha 1985	Agolm.	Humed.	Densid.	C. simp. probeta 7 d.	C. simp. probeta 28 d.	Comp. simp. testigos días
1	21 Enero	—	6,60	2,28	41,50	48,00	
2	22 Enero	—	6,60	2,38	—	70,00	80 140,00
3	29 Enero	11,00	5,80	2,26	31,00	44,05	72 101,00
4	29 Enero	—	—	—	—	—	—
5	29 Enero	—	—	—	—	—	72 215,00
6	30 Enero	12,00	4,50	2,16	—	—	
7	30 Enero	—	—	—	—	—	71 120,00
8	31 Enero	14,46	5,60	2,18	42,00	62,75	
9							70 254,00
10							70 190,00
11	1 Febr.	16,50	5,30	2,22	56,00	72,00	
12	4 Febr.	9,18	5,37	2,29	49,93	72,67	
13	6 Febr.	13,00	6,00	2,34	57,70	102,00	
14	7 Febr.	12,18	5,79	2,28	27,20	88,53	63 148,00
15	13 Febr.	8,20	5,80	2,30	46,00	69,67	
16	15 Febr.	9,87	5,83	2,33	50,53	70,67	
17	20 Febr.	10,58	6,11	2,32	42,35	85,63	50 158,00
18							50 153,00

Figura 30.—Extracción de testigos a rotación (Ø 100 mm) y resultados de los ensayos. (Resistencia en Kp/cm²).

Mezcla: 5 % mezcla molida conjunta.
80 % cenizas, 20 % clinker.
45 % gravilla.
20 % trito.
35 % arena.

PROCTOR

Número	Fecha	D	h %	7 días	28 días
1	27-6-85	2,37		8,50	
2	27-6-85	2,34		13,30	
3	27-6-85	2,33		14,10	
4	27-6-85	2,32	5,00		79,00
5	27-6-85	2,33			62,00
6	27-6-85	2,41			85,00

Mezcla: 18 % mezcla molida conjunta.
80 % cenizas, 20 % clinker.
14 % gravilla.
40 % trito.
28 % arena.

18 % Cenizas-cemento

Número	Fecha	D	h %	7 días	28 días
1	24-4-85	2,40	6,30		306,00
2		2,36	6,30		221,00
3		2,31	6,30	119,00	
4		2,28	5,00		204,00
5		2,36			209,00
6		2,26			209,00
7					
8					
9		2,35		102,00	
10		2,31			192,00

Figura 31.—Estudio con diferentes proporciones de conglomerante (formado por la mezcla con el 80 por 100 de cenizas volantes y el 20 por 100 de clinker, molidos conjuntamente).

producto. Se ha podido comprobar que puede ser fabricado exactamente igual que otra base tratada. También se ha constatado que es más fácil de poner en obra y de rasantear con niveladora. Su compactación, a consecuencia de la mayor cantidad de finos, es más sencilla que la de una grava-cemento. Conviene señalar aquí la mayor sensibilidad de la mezcla al exceso de humedad, ya que en este caso se plantean problemas de ondulaciones, que pueden ser corregidos con un escarificado y rasanteado una vez oreado el material.

8.2. Inicio y fin de fraguado favorable

El comienzo y final del fraguado se retrasan respecto a lo que ocurre con una grava-cemento convencional o con un hormigón pobre. Ello supone una ventaja para la puesta en obra.

8.3. Curado y fisuración

No ha habido problemas ni de curado ni de fisuración, aunque conviene señalar que la primavera asturiana es muy favorable a estos efectos.

8.4. Posibilidad de hacer la mezcla en obra

A efectos de resistencia, se ha comprobado que, es lo mismo tratar a la ceniza como un árido, o mezclada íntimamente con el cemento para formar un conglomerante con un alto contenido en ceniza.

8.5. Costes muy favorables

Económicamente la mezcla in-situ es muy favorable ya que con los costes actuales (cemento 8.300 Ptas/T. y ceniza 207 Ptas/T.) una tonelada de mezcla (4:1) vale 1.884 pesetas, mientras que el cementero la cobra a 3.540 pesetas (en 1987 entre 6.000 y 6.500 pesetas):

8.6. Necesidad de mejorar las plantas de fabricación

Se ha detectado un problema, común a todas las plantas empleadas, que es el de la mala calidad de las plantas de dosificación volumétrica existentes en España que no garantizan un mínimo de precisión en las dosificaciones del ligante.

Por ello, dada la obsolescencia del parque (que se refleja también en la gran cantidad de paradas por averías) y la necesidad de reformarlo, cara al Plan Nacional de Carreteras, se aconseja exigir a las nuevas plantas un control ponderal del conglomerante y de, al menos, de la salida de un silo de áridos, lo que permitirá la dosificación exacta de la ceniza (ó de la escoria, en grava-escoria) si se la trata como un árido. Asimismo dispondrán de caudalímetro y totalizador.

8.7. Rugosidad superficial

Se ha conseguido, en Laboratorio, una rugosidad suficiente en la superficie de la grava-ceniza-cemento después de someterla a un lavado con jabón diluido en agua. Ello abre la posibilidad de su utilización como capa de rodadura en vías de poco tráfico.

8.8. Resistencia estructural adecuada

El comportamiento del tramo sometido al tráfico con solamente un doble tratamiento superficial como capa de rodadura fue adecuado.

9. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Realizada esta obra, y a la vista de los buenos resultados obtenidos, la Dirección de la misma se propuso realizar otra con este material, en este caso el tramo de acceso a Luarca por la CN-632, la que se proyectó con una base de grava-ceniza-cemento y capa resistente de hormigón seco compactado.

AGRADECIMIENTO

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a los señores don José Luis Ibarzabal, licenciado en Ciencias Químicas, jefe del Laboratorio de Materiales, así como a don José Antonio Fernández López, técnico en Control y Vigilancia de las Obras, ambos de la Demarcación de Carreteras del Estado-Asturias, cuya inestimable colaboración ha permitido sacar adelante este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. American Concrete Institute, ACI. «Roller Compacted Concrete, ACI 207. 5 r. 80». 1980.
2. ASINEL, «Las cenizas volantes y sus aplicaciones». Selecciones Gráficas, Madrid, 1972.
3. Benzekri, E. M. Tiapani, A., «Essai d'approche methodologique de l'utilisation des graves traitées aux liants hydrauliques et puzzolaniques en construction routiere», Revue Generale des Routes et des Aerodromes, num. 526, XII-1976.
4. Bogue, R. H., «La química del cemento Portland», Dossat, Madrid, 1952.
5. Bonnot, J. Ray, M. «La nouvelle directive pour la realisation des assises de chaussées en graves trai-

- tees aux liants hydrauliques», Revue Generale des Routes et des Aerodromes, num. 602, XI-1983.
6. Calleja, J., «Las Puzolanas», Monografía del Instituto E. Torroja, núm. 281, Madrid, VII-1968.
 7. Dunstan, M.R.H., «Development of high flyash content concrete». Proc. Inst. C. Eng. VIII-1983.
 8. Estabisol, «Hormigon seco compacto con rodillo, cemento tipo V (U.N.E. 80 301). colocación en la fabrica Tudela-Asturias, S. A.», Aboño, Asturias, 14-IX-1985.
 9. Fernandez Paris, «La carbonatación de la pasta hidratada de cemento Portland. Interpretación físico-química», Monografía del Insituto E. Torroja, núm. 310, Madrid, V-1973.
 10. García-Arango, I. Molina, F. Galquera, L. «Uso de cenizas volantes en carreteras», Jornadas Tecno-logicas sobre cenizas, Oviedo, 2 a 4-VII-1986.
 11. Hobeda, P., «Stabilization of marginal aggregates with hydraulic and puzzolanitic binders based on waste materials», Bulletin of the International Association of Engineering Geology, num. 30, Paris, 1984.
 12. Jarrige, A., «Les cendres volantes», Eyrolles, Paris, 1971.
 13. Jofre, C. Colmenarejo, A. García-Arango, I. Hacar, F. «Empleo de mezclas de cemento y cenizas volantes como conglomerante en capas de base de carreteras». Tenth Argentinian Congrès on Road and Traffic, Buenos Aires. X-1985.
 14. Josa, A. Jofre, C. Molina, F. «An experimental overlay with rolled concrete». Concrete in Transportation, Vancouver, IX-1986.
 15. Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, «Recommandation pour la realisation des assises de chaussees en graves-cendres volantes-chaux et sables-cendres volantes-chaux», Paris, X-1978.
 16. López Ruiz, A.; «La utilización de las cenizas volantes según el reciente simposium de Pittsburg», Revista de Materiales de la Construcción, X-1967.
 17. Luxan Baquero, M. «Conglomerantes puzolanicos», Revista Informes de la Construcción, núm. 196, XII-1967.
 18. Marie, P., «Un material economico: Las cenizas volantes», Equip. Mecanique Carrieres et Materiaux, VI-1978.
 19. Mateos, M., «Estabilización de dos tipos de caliza con cenizas volantes solamente», Revista Cimbra núm. 148, XII-1977.
 20. Mateos, M., «Reistencias de mezclas de puzolana natural, cal y arena», Revista de Obras Públicas, Madrid, I-1977.
 21. Ministerio de Industria y Energia, «Estadística de Energia Electrica 1983». Madrid 1983.
 22. Ministerio de Obras Públicas, «Pliego de Prescripciones Técnicas para obras de Carreteras y Puentes», Madrid 1975.
 23. Presidencia del Gobierno. «Pliego de Prescripciones Técnicas para la Recepción de Cementos», Madrid, 23-V-1975.
 24. Recherche Routiere. «Utilisation des dechets et sous-produits en technique routiere», OCEDE, Paris, 1977.
 25. Rousseau, G. «Utilización de cenizas para estabilización de capas de base», Revue Generale des Routes et des Aerodromes, VI-1983.
 26. Salcedo, A. J., «Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantia elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo», Revista de Obras Públicas, XII-1986.
 27. Salmador Alvarez, F., «Las cenizas volantes y sus aplicaciones. Propuesta de normas U:N.E.» ASINEL, 1967.
 28. Taylor, H.F.W., «La química de los cementos», Urmo, Bilbao, 1967.
 29. Venaut, M. Papadakis, M., «Control de cementos, morteros y hormigones», Urmo. Bilbao 1966.
 30. UNESA. «Memoria Estadística Electrica», 1984.

